www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

10e JAARGANG No. 8, blz. 225-256 AUGUSTUS 1948

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

EEN EXPERIMENTELE ZEND- EN ONTVANGINSTALLATIE VOOR SNELLE FACSIMILE-OVERDRACHT

I. ALGEMENE GEGEVENS

621.397.3

door H. RINIA, D. KLEIS en M. van TOL.

In de laatste jaren is te Eindhoven een nieuw systeem voor facsimile-overdracht uitgewerkt, dat in staat is, tekeningen, foto's of teksten ter grootte van een vel A4-formaat (21 × 29,7 cm) in 8 seconden via een kabel of een radioverbinding over te brengen. Het systeem werkt continu: de documenten, waarvan het formaat, behoudens een beperking van de maximale breedte tot 22 cm, willekeurig is, worden in de zender op een lopende band zonder einde gelegd, hierop electrisch „vastgekleefd" en door een snel roterend optisch systeem afgetast. In de ontvanger worden op een continu doorgetrokken filmstrook zes maal verkleinde, negatieve of positieve, reproducties van de originele documenten geschreven. De filmband wordt lopend ontwikkeld en gefixeerd en kan onmiddellijk daarna vergroot op lichtdrukpapier worden afgedrukt, bijv. op hetzelfde formaat als het origineel. Het scheidend vermogen van het systeem is 5 lijnen per mm, hetgeen overeenkomt met de beste weergave die bij de oudere, langzaam werkende facsimile-systemen wordt gerealiseerd. Een aantal kenmerkende eigenschappen en toepassingsmogelijkheden van het nieuwe systeem worden in dit artikel besproken. Een nadere beschrijving van de mechanische, optische en electrische details zal in enkele volgende artikelen worden gegeven.

In 1843, toen de codetelegrafie volgens Morse pas enkele jaren oud was, demonstreerde de Engelse natuurkundige Bain reeds een apparatuur waarmee hij met de hand geschreven lettertekens via een electrische leiding op een andere plaats kon reproduceren. Caselli bracht in 1865 in Frankrijk een aantal experimentele verbindingen met deze zg. facsimile-telegrafie tot stand, waarbij 600 geschreven woorden per uur konden worden overgebracht. Omstreeks 1890 hadden allerlei Amerikaanse proefnemingen op dit gebied plaats, en in 1907 functionneerde in Europa gedurende korte tijd een heel net van verbindingen voor het telegrafisch overbrengen van krantenillustraties. Na de eerste wereldoorlog, voornamelijk tussen 1922 en 1928, werden in een reeks systemen belangrijke verbeteringen der facsimile-techniek tot ontwikkeling gebracht [1]), en de hiermee geïnstalleerde verbindingen bleken levensvatbaarheid te bezitten. De beeldtelegrafie-netten in Amerika en in Europa breidden zich voortdurend uit en er kwamen ook vaste intercontinentale verbindingen tot stand. In Europa waren in 1931 reeds meer dan 25 stations in bedrijf, en in 1937 stond bijv. Londen in permanente beeldtelegrafische verbinding met vele Europese hoofdsteden en met New York, Buenos Aires en Melbourne.

Deze korte — en trouwens uitermate onvolledige — historische schets is slechts bedoeld om in het licht te stellen dat de beeld- of facsimile-overdracht reeds lang een plaats inneemt in de communicatietechniek, naast de aloude telegrafie met Morsetekens, de telefonie, de telex, en, als jongste aanwinst, de televisie.

Inderdaad ligt het voor de hand, dat de mogelijkheid om een beeld via kabel of radio over te brengen, een essentiële, voor vele toepassingen vatbare aanvulling betekent op de gebruikelijke overbrenging van het gesproken of in genormaliseerde lettertekens gefixeerde woord. Een brieftekst kan aldus telegrafisch worden overgebracht

[1]) Als enkele der belangrijkste systemen noemen we: Korn 1922, Bartlane 1922, Belin 1924, Jenkins 1924, Amer. Tel. & Tel. (Bell System) 1924/25, R.C.A. (Ranger) 1924/25, Siemens-Karolus-Telefunken 1927, Westinghouse (Zworykin) 1928.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zonder hem te ontdoen van het individuele kleed waarin hij is gestoken: het handschrift van de briefschrijver. Een chèque met de daarop geplaatste handtekening kan binnen enkele minuten op ver verwijderde plaatsen worden overgelegd en gecontroleerd. Technische tekeningen, waarvan de details niet door omschrijving met woorden zijn duidelijk te maken; weerkaarten, die de met het uur veranderende meteorologische situatie aangeven; actuele krantenfoto's; teksten in talen die geen letterschrift bezitten, zoals het Chinees — ziedaar enkele van de objecten voor welker snelle overbrenging men op de beeldtelegrafie is aangewezen.

In de laatste tijd worden van verschillende zijden pogingen gedaan om de facsimile-overdracht een nog omvangrijker taak in de maatschappij te doen vervullen. Hierbij kan men twee ontwikkelingsrichtingen onderscheiden:

1) In Amerika wordt een verruiming van het toepassingsgebied nagestreefd door facsimile-overdracht in te voeren als onderdeel van omroepuitzendingen. Met betrekkelijk eenvoudige facsimile-ontvangtoestellen (bijv. volgens de systemen Finch, Hogan of Alden), die op elk normaal radio-ontvangtoestel kunnen worden aangesloten in de plaats van de luidspreker, wil men de luisteraars een krant met actuele foto's thuisbezorgen en allerlei uitzendingen door visuele toelichtingen verrijken. Eveneens tracht men de facsimile-communicatie ingang te doen vinden bij mobiele diensten, zoals politie, brandweer, taxi's, vliegtuigen, ten einde van of naar een centrale instantie situatieschetsjes en schriftelijke orders (bij de politie bijv. ook vingerafdrukken) te kunnen doorgeven, die aan de ontvangzijde automatisch worden opgenomen en die in mindere mate dan mondelinge aanwijzingen onderhevig zijn aan misverstand.

2) De andere ontwikkelingstendentie is gericht op een versnelling van de overdracht en daarmee op een intensivering van het beeldtelegrafische verkeer tussen twee vaste stations. Reeds 20 jaar geleden werden pogingen in deze richting gedaan, o.a. door Alexanderson [2]) en door Zworykin [3]). Een blijvend succes is aan deze pogingen niet beschoren geweest. Het komt ons echter voor dat men dit mislukken als een parallel moet zien van hetgeen zich bij de normale „langzame" facsimile-techniek heeft voorgedaan. Het hierboven genoemde, in 1907 geïnstalleerde net verdween spoedig weer van het toneel. In de jaren na 1924 echter kwam het tot een duurzame invoering van facsimile-verbindingen, ten dele dank zij een betere beeldkwaliteit en grotere bedrijfszekerheid dan voordien waren bereikt, ten dele ook dank zij een gestegen behoefte aan dit communicatiemiddel. Het ligt voor de hand dat ook de bedoelde intensivering van het facsimile-verkeer een feit zal kunnen worden, zodra de genoemde gunstige factoren hiervoor aanwezig zijn.

Met deze mogelijkheid voor ogen is thans, na voorbereidende werkzaamheden die zich over verscheidene jaren hebben uitgestrekt, in het Philipslaboratorium te Eindhoven een nieuw systeem voor zeer snelle facsimile-overdracht uitgewerkt, waarbij door gebruik van moderne hulpmiddelen zowel een uitstekende beeldkwaliteit als een grote mate van bedrijfszekerheid zijn verwezenlijkt. Het laat zich aanzien dat in ons huidige maatschappelijke leven de hierdoor geschapen mogelijkheden een gunstige voedingsbodem voor de ontwikkeling van belangrijke toepassingen zullen vinden.

Aan de beschrijving van het nieuwe facsimile-systeem, die wij in een aantal artikelen in dit tijdschrift willen geven, laten wij hier een overzicht voorafgaan van de grondslagen en de belangrijkste eigenschappen er van, waarbij tevens iets over specifieke toepassingsmogelijkheden zal worden gezegd. Achtereenvolgens zullen dan in de later te publiceren artikelen worden behandeld: de bouw van de zender, de bouw van de ontvanger, optische bijzonderheden, details van de electrische schakelingen voor de transmissie, en ten slotte de synchronisatie van ontvanger en zender.

Algemene gegevens van het nieuwe systeem

Bij alle thans geregeld in gebruik zijnde methoden van beeldtelegrafie wordt het over te brengen beeld afgetast door een lichtvlekje, dat aan elkaar sluitende, evenwijdige smalle lijnen op het oppervlak van het beeld doorloopt. Het gereflecteerde (of doorgelaten) licht, dat naar gelang van de plaatselijke zwartheid van het beeld in sterkte varieert, wordt met behulp van een fotocel omgezet in een variërende electrische spanning: het beeldsignaal. Dit wordt naar de ontvanger gezonden via een kabel of een radioverbinding. In de ontvanger wordt het signaal gebruikt om bijv. de sterkte van een lichtbundel te besturen, die, synchroon met het aftastvlekje in het zendstation, opeenvolgende lijnen op een vel lichtgevoelig materiaal beschrijft en daarbij door zijn wisselende sterkte de zwartingsverdeling van het originele beeld reproduceert.

[2]) Zie bijv.: F. Schröter, Handbuch der Bildtelegraphie und des Fernsehens, Springer Berlijn 1932, p. 414.
[3]) V. K. Zworykin, Facsimile picture transmission, Proc. Inst. Rad. Eng. 17, 536-550, 1929.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De kwaliteit van het gereproduceerde beeld zal beter zijn naarmate men een fijnere lichtvlek voor het aftasten (en neerschrijven) gebruikt. Bij de Philips-installatie heeft de in de zender gebruikte aftastvlek een diameter van *1/5 mm*, zodat in principe nog details van deze zelfde afmeting kunnen worden weergegeven. Dit komt ongeveer overeen met de beste weergave die men tot nu toe in de langzame beeldtelegrafie heeft verwezenlijkt. Ter vergelijking is in *tabel I* het overeenkomstige „scheidend vermogen" voor verschillende andere weergavemethoden vermeld [4]). In *fig. 1* is een gedeelte van een met onze installatie overgebracht document gereproduceerd.

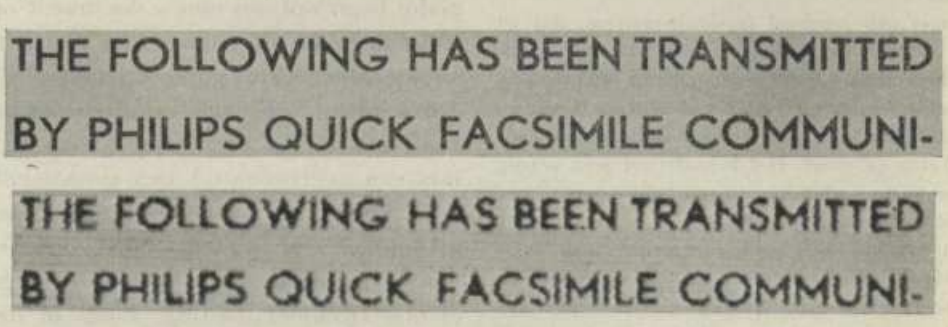


Fig. 1. Gedeelte van een document, overgebracht met het nieuwe apparaat voor snelle facsimile-overdracht. *a*) Het origineel, *b*) het overgebrachte beeld. *a*) en *b*) zijn beide tot 2× het formaat van het origineel vergroot; dank zij deze vergrote reproductie is de invloed van de onscherpte van het tijdschriftcliché (vgl. tabel I) op de beeldkwaliteit uitgeschakeld. Voor een juiste beoordeling bekijke men de beelden op ca 50 cm afstand (2× de afstand van duidelijk zien).

Tabel I. Scheidend vermogen in lijnen per mm voor diverse weergavemethoden.

Krantenfoto	2-4
Halftoon-cliché's Philips Technisch Tijdschrift	6
Normale langzame facsimile-overdracht (105 lijnen per inch)	4
Snelle facsimile-systeem Philips	5
Fotografische opname op positief-film	55

Het nieuwe systeem is ingericht voor het overbrengen van documenten met een breedte tot ongeveer 22 cm, d.i. de maximale voorkomende breedte van de gangbare briefformaten, en met een willekeurige lengte. Een vel van het zg. *A4-formaat*, dat 29,7 cm lang is (het komt ongeveer overeen met het formaat van dit tijdschrift), wordt *in 8 seconden overgebracht*. Bij de gebruikelijke facsimile-systemen heeft men voor het overbrengen van een document van het genoemde formaat gewoonlijk ca 8 minuten nodig (in enkele gevallen minder, bijv. 2 tot 3 minuten, in vele gevallen echter nog meer, nl. tot 20 minuten).

Het aantal beeldelementen (dwz. oppervlaktestukjes ter grootte van de aftastvlek) dat men per seconde over een gegeven communicatieweg kan zenden, houdt rechtstreeks verband met de hoogste op die weg toelaatbare modulatiefrequentie. In ons geval, waarin de vlekbreedte 0,2 mm bedraagt, bevat een A4-vel $297:0{,}2 \approx 1500$ af te tasten lijnen en zijn er op elke lijn $210:0{,}2 \approx 1000$ beeldelementen. Er moeten dus $1{,}5 \cdot 10^6$ elementen in 8 seconden worden overgebracht, hetgeen in het ergste geval, nl. wanneer de opeenvolgende elementen afwisselend wit en zwart zijn, correspondeert met 200 000 lichtwisselingen per seconde en derhalve met een *hoogste modulatiefrequentie van 100 kper/sec*. Een frequentieband van een dergelijke breedte staat ter beschikking bijv. bij ultrakorte-golfzenders, die vaak, voorzien van gerichte antennes, voor vaste verbindingen tussen twee punten worden gebruikt. Ook op de tegenwoordige kabelnetten voor draaggolftelefonie kan meestal met de genoemde bandbreedte worden gewerkt. Het Nederlandse net bijv. laat zelfs modulatiefrequenties tot ruim 200 kper/sec toe. Overigens is de genoemde grens van 100 kper/sec in werkelijkheid natuurlijk niet zo scherp bepaald. Bij proeven is gebleken dat bij uitzending van de signalen van onze installatie over een net met een maximale modulatiefrequentie van 80 kper/sec ook nog een zeer behoorlijke weergavekwaliteit wordt verkregen. Desgewenst kan men bij sterkere beperking van de hoogste modulatiefrequentie de overdrachtssnelheid verminderen ten einde hetzelfde scheidend vermogen te handhaven. Hiertoe laat men eenvoudig de zender en ontvanger wat langzamer lopen; de gebezigde synchronisatiemethode laat dit zonder meer toe.

[4]) Het ligt voor de hand ook de weergave door televisie bij de vergelijking te betrekken. Voor de beoordeling van een televisiebeeld moeten echter andere maatstaven worden aangelegd, omdat men hier met bewegende beelden te maken heeft. Bovendien worden deze beelden op veel grotere afstand bekeken dan een brief of een krantenfoto, nl. evenals bij de bioscoop het liefst op zodanige afstand dat het gehele beeld zonder beweging van het oog goed kan worden overzien.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Uit de gewone telegrafie is het wel bekend, dat de totale hoeveelheid informatie (aantal volgens een bepaald systeem gecodeerde lettertekens) die men per tijdseenheid kan overseinen, theoretisch ruwweg evenredig is met de breedte van de beschikbare frequentieband, onafhankelijk van de soort apparatuur [5]). Iets dergelijks geldt voor de beeldtelegrafie, waarbij de totale hoeveelheid „informatie" door het aantal beeldelementen is gegeven. We willen hier drie opmerkingen aan vastknopen. Ten eerste: voor de „prestatie" van een facsimile-systeem is de frequentieband, dus het aantal beeldelementen dat de apparatuur per seconde vermag over te seinen, een betere maatstaf dan het per seconde overgebrachte oppervlak. Immers, een bepaald oppervlak is bij gegeven frequentieband ook wel sneller over te brengen, als men met minder lijnen per mm genoegen neemt (bijv. een grotere aftastvlek gebruikt).

Ten tweede: met een normaal facsimile-systeem, dat 60 maal langzamer is dan het onze, kan men, bij dezelfde beeldkwaliteit en een beschikbare frequentieband van 100 kper/sec, ruwweg ook hetzelfde beeldoppervlak per minuut overbrengen, mits men de beschikbare band in 60 kanalen splitst en 60 zend- en ontvangapparaten gebruikt. Het behoeft wel geen betoog dat dit, voor een vaste verbinding tussen twee punten, zeer oneconomisch en omslachtig zou zijn.

Ten derde: in principe kan men documenten ook overbrengen via televisie, indien men het scherm waarop in de ontvanger het beeld verschijnt, fotografeert. Aangezien het echter bij de televisie begonnen is om het overbrengen van bewegende beelden en derhalve één beeld (van bijv. 567 lijnen) in ca 1/25 seconde moet worden overgebracht, heeft men hier een nog veel bredere frequentieband nodig, nl. van 2000 tot 3000 kper/sec breedte. Van een economisch gebruik van deze band voor facsimile-overdracht kan slechts sprake zijn indien de snelheid nog 20 tot 30 maal groter wordt gemaakt dan bij ons nieuwe facsimile-systeem. Terwijl wij menen dat de door ons bereikte snelheid in bepaalde gevallen aan een practische behoefte zal beantwoorden, lijkt het ons twijfelachtig of voor een systeem met nog 20 maal hogere snelheid duurzaam emplooi te vinden zou zijn. Bovendien wordt het dan, om de documenten met voldoende snelheid te kunnen aanvoeren, noodzakelijk aan de zendzijde eerst een film hiervan op te nemen, hetgeen een onaangename complicatie betekent; voorts wordt het probleem van de gevoeligheid van het registreermateriaal, dat, zoals wij zullen zien, bij het ontwerpen van ons facsimile-systeem reeds een belangrijke rol speelde, voor veel hogere snelheden haast onoverkomelijk.

Met een verbreding van de gebruikte frequentieband neemt ook het geruis toe, dat afkomstig is van de fluctuerende emissie der electronen in de fotocel en van de fluctuerende beweging der electronen in de weerstand welke dient voor de koppeling van de fotocel aan een versterker. Bij onze snelle facsimile-overdracht zal derhalve het geruis, absoluut genomen, belangrijk sterker zijn dan bij de langzame facsimile-systemen. Toch kon een storingsvrije weergave worden verwezenlijkt door het gebruik van een fotocel met versterking door secundaire emissie (multiplicatorbuis). De inwendige versterking van dergelijke buizen bedraagt bijv. een factor 100 000. Het ruisen van de genoemde weerstand wordt daardoor geheel onschadelijk gemaakt (bovendien wordt de apparatuur vereenvoudigd). In ons geval werd zodoende een *verhouding tussen signaal en geruis* bereikt van *43 db*. Dit is zelfs nog belangrijk beter dan bij de meeste langzame facsimile-systemen.

Bij de gebruikelijke langzame facsimile-systemen wordt de hierboven geschetste aftasting van het beeld verwezenlijkt door het document op een trommel te spannen, die men laat roteren, terwijl de aftastoptiek langzaam in de asrichting langs de trommel verschuift. De enkele seconden die men nodig heeft om een nieuw document op de trommel te brengen (of de trommel te verwisselen voor een andere, die van te voren „geladen" is), doen er bij een zendtijd van enige minuten per document niet veel toe. Werkt men echter zoals in ons systeem met een overbrengtijd van slechts enige seconden, dan zouden de geregelde onderbrekingen van het uitzenden zeer nadelig zijn voor het rendement van de installatie. Wij zijn derhalve afgestapt van de aloude trommelaftasting. Zoals in *fig. 2*, een foto van de nieuwe facsimile-zender, is te zien, worden de documenten los op een lopende band zonder einde gelegd. Zij worden vervolgens electrisch op de band „vastgekleefd". De band wordt voortbewogen met een snelheid van 30 cm per 8 seconden, en de documenten, die kunnen bestaan uit licht of donker papier met er op aangebrachte tekeningen of foto's of geschreven, getypte of gedrukte letterteksten, worden op een bepaalde plaats door een snel roterend optisch systeem afgetast. Een bijkomstig voordeel van deze *continue aftastmethode* is, dat het document niet noodzakelijk A4-formaat moet hebben; *elk formaat is toelaatbaar*, mits de breedte niet groter is dan ca *22 cm* [6]).

Zoals gezegd, wordt bij onze installatie een beeld dat $1{,}5 \cdot 10^6$ beeldelementen bevat in 8 seconden overgeseind. Dit betekent dat in de ontvanger voor het belichten van elk beeldelement een tijd van slechts 1/200000 sec ter beschikking staat. Als lichtbron, waarvan de lichtsterkte de modulatie met frequenties tot 100 kper/sec kan volgen, hebben wij een speciaal gasontladingslampje ontwikkeld. Met dit lampje, in combinatie met een lichtsterke optiek, bleek het mogelijk op *normale positief-film*

[5]) Zie bijv. J. te Winkel, Draaggolftelegrafie, Philips techn. T. **8**, 206-213, 1946.

[6]) Het principe van de continue aftasting werd voor het eerst in 1928 door Alexanderson toegepast. Een essentiële verhoging van de overdrachtsnelheid, die voor ons de belangrijkste reden was om deze aftastmethode toe te passen, was echter bij de toenmalige stand der techniek nog niet met bevredigend resultaat mogelijk. Men beschouwde dan ook indertijd het vermijden van het opspannen op trommels en het voordeel van het willekeurige formaat als de hoofdzaak.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 2. Zender van de Philips-apparatuur voor snelle facsimile-overdracht, tijdens het bedrijf. Documenten van willekeurig formaat, met een breedte tot 22 cm, worden op een band zonder einde gelegd die onder de opening in de dekplaat langs loopt. De afgewerkte documenten vallen in een verzamelbakje dat vooraan zichtbaar is.

in de genoemde zeer korte belichtingstijd de gewenste zwarting (maximaal 1,5) te verkrijgen. Het scheidend vermogen van dit materiaal is veel hoger dan dat van onze aftastvlek (zie tabel I), en het beeld in de ontvanger kan dus zonder verlies van detail op veel kleiner formaat dan dat van het origineel worden geregistreerd. Het ontvangapparaat is daarom zo geconstrueerd dat het een $6\times$ *verkleind beeld* van het origineel levert. De nodige hoeveelheid film wordt hierdoor met een factor 36 gereduceerd.

De 45 mm brede filmband wordt continu door het ontvangapparaat heen getrokken, terwijl op een bepaalde plaats door een snel roterend optisch systeem de lijnen met van punt tot punt wisselende zwarting er op worden geschreven. Na het ontwikkelen en fixeren kunnen de ontvangen documenten, bij nog natte film, op ware grootte worden geprojecteerd. Desgewenst kan men aldus een of meer copieën van elk document op een goedkoop lichtdrukpapier maken. *Fig. 3* geeft een foto van het ontvangapparaat.

Om het overzicht van eigenschappen van het

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nieuwe systeem enigszins volledig te maken, vermelden we hier nog, dat door een eenvoudige omschakeling in de ontvanger een negatief dan wel een positief beeld van het originele document kan worden verkregen. De electrische schakeling is zo ingericht dat ook de gemiddelde helderheid van het originele document (de „gelijkstroomcomponent" van het beeldsignaal) aan de ontvangzijde behouden blijft. Ten slotte is het mogelijk zowel zwart-witte beelden als ook beelden met halftinten (foto's) over te brengen [7]).

De synchronisatie van de roterende optische systemen van zender en ontvanger wordt bewerkstelligd door middel van, mèt het beeld overgezonden, synchronisatiesignalen, die het toerental van de aandrijvende motor aan de ontvangzijde beïnvloeden. Dank zij de synchronisatie zijn de maximaal voorkomende afwijkingen in fase tussen zender en ontvanger beperkt tot ca $^1/_2{}^\circ$, hetgeen overeenkomt met een verschuiving van een lijn in haar eigen richting over een lengte van slechts 0,5 mm. Na een eventuele storing herstelt de relatieve fase zich aperiodisch, in een tijd van ongeveer 1 sec, hetgeen overeenkomt met de tijd voor het schrijven van ongeveer 200 lijnen. De onderlinge verschuiving van naburige lijnen is dus zelfs in het ergste geval nog onmerkbaar.

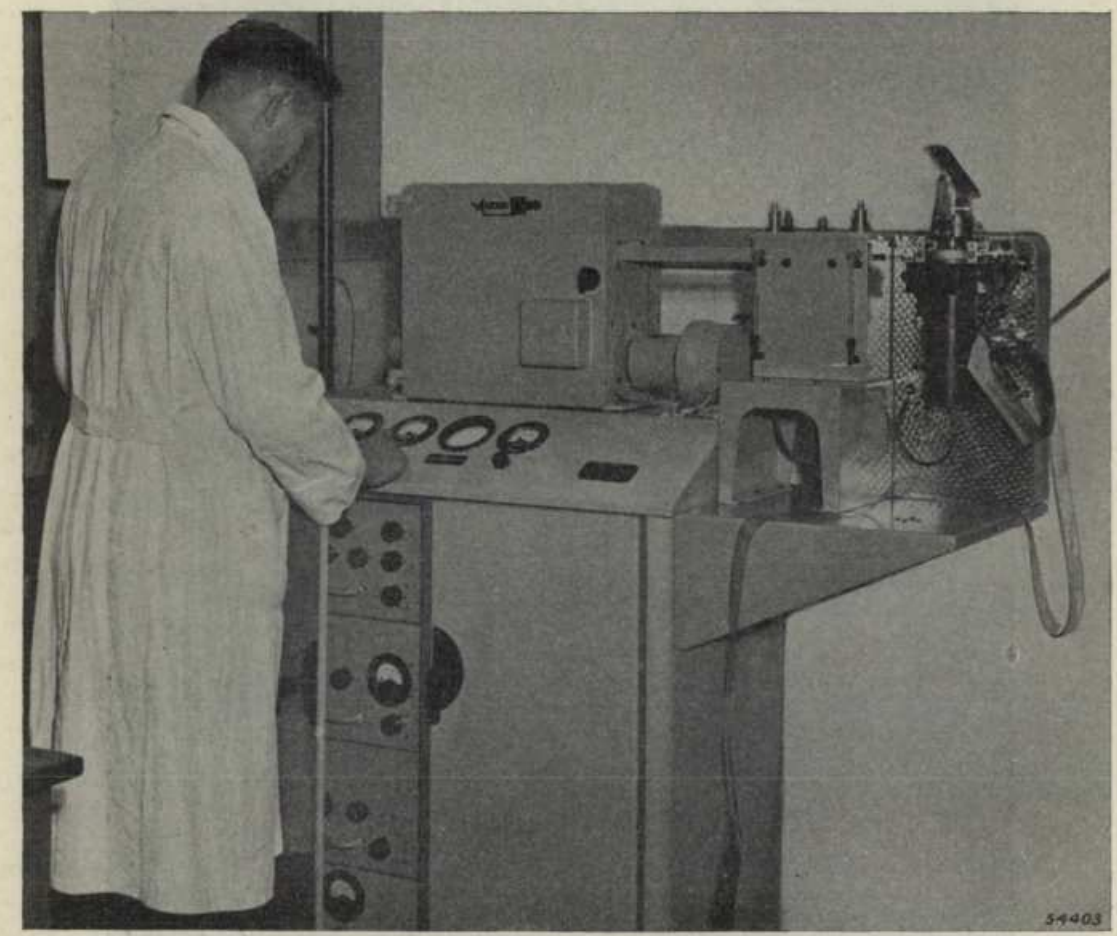


Fig. 3. Ontvangapparaat voor snelle facsimile-overdracht. Rechts ziet men de filmstrook, waarop de ontvangen documenten geschreven zijn, uit het toestel komen.

Toepassingsmogelijkheden van het nieuwe systeem

Hoewel de beeldtelegrafie haar specifieke taak moet zien in het overbrengen van beelden, is het wel duidelijk dat er nauwelijks een plaats op de wereld zal zijn met een dusdanige concentratie van over te brengen beeldmateriaal dat het beschreven snel-werkende facsimile-apparaat er doorlopend in bedrijf zou kunnen worden gehouden. Ten aanzien van de toepassingsmogelijkheden is dan ook in de eerste plaats gedacht aan teksten, eventueel afgewisseld met beelden. Een typisch voorbeeld, waarin alle voordelen van het nieuwe facsimile-systeem tot hun recht komen, treft men aan in het krantenbedrijf.

[7]) Soms wordt de naam beeldtelegrafie speciaal voor de overdracht van halftoonbeelden gebezigd, en reserveert men de aanduiding facsimile-telegrafie voor zwart-witte beelden, — een onderscheid dat wij hier niet hebben gevolgd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het is een veel verbreide werkwijze om van grote kranten, die in de hoofdsteden verschijnen, identieke uitgaven — evtl. met toevoeging van een blad met plaatselijk nieuws — in de provincie te drukken en te verspreiden. De tekst van het belangrijkste nieuws der hoofduitgave wordt, om niet teveel aan actualiteit te verliezen, telefonisch of per telex naar de desbetreffende plaats in de provincie overgezonden. Bij een normale telex-verbinding is hiervoor een tijd van $2^1/_2$ minuut per 1000 letters nodig, dwz. voor 2 pagina's met elk bijv. 40 000 letters een totale tijd van ca 3 uren. Vervolgens moet de tekst gezet en gecorrigeerd en het zetsel „opgemaakt" worden alvorens met drukken kan worden begonnen. Met het nieuwe facsimile-systeem kunnen dezelfde 2 pagina's van de krant, nadat men deze in 8 vellen van A4-formaat met 10 000 letters per vel heeft onderverdeeld, in ca 1 minuut worden overgeseind. Opnieuw zetten, corrigeren en opmaken is niet nodig, daar van de verkleinde beelden op de film, die men aan de ontvangkant verkrijgt, rechtstreeks cliché's op ware grootte kunnen worden gemaakt, waarmee de krant dan kan worden gedrukt. Het maken van de cliché's kost veel minder werktijd en personeel dan het zetten enz. Eventuele lijntekeningen en foto's in de originele krant kunnen zonder enige complicatie mee worden verwerkt.

Een andere toepassing, waarbij van essentiële eigenschappen van het nieuwe facsimile-systeem gebruik wordt gemaakt, zou kunnen bestaan in het overbrengen van briefpost tussen de grote centra des lands. Een apparaat volgens het hier beschreven systeem zou in 5 uren tijds, bijv. gedurende de nacht, waarin de kabels voor draaggolftelefonie min of meer ongebruikt liggen, ruim 2000 brieven van A4-formaat (of evenredig meer van kleiner formaat) kunnen overbrengen. Voor bepaalde gevallen, bijv. als een eensluidende brief aan een aantal adressen moet worden gezonden, kan het een bijzonder voordeel zijn dat men de brief slechts éénmaal behoeft over te seinen: immers, het ontvangapparaat levert een (desgewenst negatief) filmpje van de brief, waarvan men ter plaatse het gewenste aantal copieën kan maken. Ook kan men elke brief in twee of meer copieën aan de geadresseerde ter hand stellen, zoals voor zaken-correspondentie veelal gebruikelijk is. Indien een archief van binnenkomende stukken wordt bijgehouden, kan het zeer nuttig zijn dat automatisch een filmpje op klein formaat van elk stuk beschikbaar is. Voor dergelijke archieven wordt thans reeds vaak van het hulpmiddel der micro-documentatie gebruik gemaakt.

Wellicht zullen de genoemde voordelen de gedachte wekken, als zou het nieuwe facsimile-systeem geroepen zijn om ook de telex te vervangen. Dit is niet waarschijnlijk, aangezien de telex, bestemd voor een beperkter prestatie dan de facsimile-overdracht, die prestatie op meer economische wijze verricht. Voor een goed inzicht lijkt het ons gewenst dit nog nader toe te lichten. Uit de genoemde cijfers volgt, dat de telex een boodschap van 4000 letters, d.i. het aantal dat ongeveer op een vel van briefformaat kan worden getypt, in ca 10 minuten overbrengt; onze facsimile-installatie doet hetzelfde in 8 seconden. De telex gebruikt echter voor de genoemde snelheid een frequentieband van slechts 120 per/sec, tegenover 100 kper/sec voor ons facsimile-systeem. Aangezien voor zulke verbindingen het gebruik van de kabel, dat berekend moet worden naar evenredigheid met de tijdsduur èn met de gebruikte frequentieband, verreweg het grootste gedeelte van de kosten veroorzaakt, is de telex ondanks de langzame overbrenging nog een factor 10 tot 12 economischer dan de facsimile-overdracht. De verklaring hiervan ligt voor de hand. De telex heeft voor het overseinen van elk letterteken 7 impulsen nodig. Onze facsimile-installatie brengt per A4-vel $1{,}5 \cdot 10^6$ beeldelementen ($0{,}75 \cdot 10^6$ impulsen) over, spendeert dus aan één letter gemiddeld ca 200 impulsen. De telex kan het met zo weinig impulsen stellen doordat hij profiteert van een normalisatie en een codering. De inhoud van een tekst wordt immers uitgedrukt met behulp van een klein aantal (ca 50) genormaliseerde letter-, cijfer- en andere tekens, en elk der tekens kan met behulp van heel weinig impulsen (in casu 7) worden geïdentificeerd, die volgens een bepaalde code zijn gespatieerd. De code-afspraak is buiten het transmissie-kanaal om, eens en voor al, naar de ontvangzijde overgebracht resp. in de machines verwerkt.

Het facsimile-apparaat daarentegen beijvert zich, alle individuele afwijkingen der tekens ten opzichte van hun geijkte vorm over te brengen en ook alle tussenruimten en lege plekken nauwkeurig uit te meten en te reproduceren. Economisch verantwoord is de toepassing van dit hulpmiddel daarom alleen daar, waar het juist op die afwijkingen aankomt — zoals in de geschreven brief, die met het handschrift een stuk van de persoonlijkheid van de schrijver overbrengt —, of waar juist de lege plekken mede van belang zijn — zoals op beeldvoorstellingen of in „opgemaakte" teksten —, of waar andere voordelen van het gebruikte systeem de doorslag kunnen, zoals in de hiermboven besproken toepassingsmogelijkheden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

KERAMISCHE MATERIALEN MET EEN HOGE DIËLECTRISCHE CONSTANTE

door E. J. W. VERWEY en R. D. BÜGEL. 621.315.612.4:537.226.2

In de electrotechniek wordt veel gebruik gemaakt van keramische materialen voor isolatiedoeleinden en als diëlectricum in condensatoren. In het laatste geval zal men bij voorkeur een materiaal kiezen met een hoge diëlectrische constante en kleine diëlectrische verliezen. Men is dan aangewezen op vrijwel zuiver titaandioxyde (rutiel) of een mengsel waarvan dit oxyde een voornaam bestanddeel is. Bijmengsels, die soms noodzakelijk zijn om de diëlectrische verliezen beneden een toelaatbaar maximum te brengen, kunnen de waarde der diëlectrische constante van TiO_2 belangrijk verlagen. Onderzocht wordt, hoe de hoge waarde van deze constante samenhangt met andere eigenschappen van de stof. Een nadeel van zuiver titaandioxyde is, dat zijn diëlectrische constante een grote negatieve temperatuurcoëfficient heeft. In het Philips-laboratorium te Eindhoven zijn verschillende methoden uitgewerkt om door geschikte toevoegingen te bereiken, dat deze temperatuurcoëfficient nul wordt. Als voorbeeld wordt een serie condensatoren van kleine afmetingen met een keramisch diëlectricum beschreven, die in radiotoestellen en andere apparaten met schakelingen voor hoge frequenties gebruikt worden.

In de electrotechniek worden veelal keramische stoffen gebruikt als isolerend constructiemateriaal. Hoge waarden van de capaciteit der geïsoleerde geleiders ten opzichte van aarde of van andere geleiders zijn daarbij in het algemeen schadelijk. Men houdt de capaciteiten laag door een geschikte vormgeving en door de keuze van een geschikt keramisch materiaal, nl. een soort met een kleine diëlectrische constante.

Geheel anders zijn de eisen die men stelt aan isolatiemateriaal dat als diëlectricum in condensatoren wordt gebruikt. Een hoge diëlectrische constante is dan in het algemeen voordelig. Ook deze eigenschap kan men met bepaalde keramische materialen realiseren. Bovendien kan men met zulke materialen door een geschikte keuze van grondstoffen en bereidingsmethoden ook voldoen aan de verdere eisen die voor condensatoren worden gesteld: niet te grote diëlectrische verliezen, en een niet te sterke variatie van de diëlectrische constante met de temperatuur.

De diëlectrische constante van titaandioxyde; invloed van bijmengsels

De keramische materialen met hoge diëlectrische constante die dot dusver in de techniek gebruikt zijn, bevatten in het algemeen titaandioxyde als een voornaam bestanddeel. Dit hangt samen met de omstandigheid, dat titaandioxyde (evenals een aantal titanaten) tot de zeer weinige stoffen behoort, waarvan de diëlectrische constante een uitzonderlijk hoge waarde vertoont. In de natuur komt titaandioxyde (TiO_2) in drie modificaties voor, als anataas, brookiet en rutiel. Wanneer we verder over titaandioxyde spreken, bedoelen we de vorm rutiel, die van de drie genoemde de stabiele modificatie van TiO_2 vormt, en die de hoogste waarde van de dichtheid, de brekingsindex en de diëlectrische constante bezit.

De beide laatste grootheden hangen nog af van de richting in het (tetragonale) kristal. Zij zijn in de richting van de hoofdas groter dan in die der beide loodrecht daarop staande assen. De brekingsindices bedragen 2,903 en 2,661 (voor licht van de golflengte der D-lijn), de daarbij behorende waarden van de diëlectrische constanten zijn 172 en 86 (gemeten aan een groot kristal van het mineraal rutiel). Bij een dichtgesinterd preparaat [1]), dat een groot aantal in willekeurige richtingen georiënteerde kristalletjes bevat, kan men voor de diëlectrische constante een gemiddelde waarde van ongeveer $(172 + 86 + 86) : 3 = 115$ bereiken. In de practijk is deze hoge waarde echter zeer moeilijk te verwezenlijken. In de eerste plaats bevat een titaandioxyde-massa die zo sterk gesinterd is dat aan de oppervlakte alle poriën zijn dichtgelopen, nog geringe insluitsels van lucht aan de kristalgrenzen, waardoor de schijnbare diëlectrische constante aanmerkelijk kan worden verlaagd. Bovendien zijn in de practijk bepaalde verontreinigingen, die in het algemeen een lagere diëlectrische constante hebben, onvermijdelijk, zodat in werkelijkheid de diëlectrische constante ε van technische preparaten meestal lager is dan die van zuiver titaandioxyde. Indien een verontreiniging in het titaandioxyde-rooster oplost, zodat er mengkristallen ontstaan, dan is het niet dadelijk in te zien, waarom dit tot een sterke verlaging van ε moet leiden. Maar indien de verontreiniging als een

[1]) Vgl. R. A. IJdens, Keramische bereidingswijzen en producten, Philips techn. T. **10**, 215-223, 1948 (No. 7).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

tweede, afzonderlijke fase aanwezig is en deze zelf een veel lagere ε heeft, dan is als volgt te begrijpen, dat de diëlectrische constante van het mengsel in het algemeen aanmerkelijk lager wordt door de aanwezigheid van de tweede stof.

Eenvoudigheidshalve denken we ons, dat de tweede fase in de vorm van lagen loodrecht op de richting van het electrische veld aanwezig is, zodat de electrische krachtlijnen afwisselend een diëlectricum met een hoge en met een lage diëlectrische constante doorlopen. Deze voorstelling kunnen we nog verder vereenvoudigen door over te gaan op een condensator met slechts twee lagen. We denken ons dus een vlakke condensator, waarbij de afstand der platen d is, met als diëlectricum een laag van titaandioxyde (waarvoor ε de waarde ε_1 heeft) en daartegenaan een laag van een medium met lage diëlectrische constante (ε_2) en de dikte xd. Volgens de electriciteitsleer voldoet het veld in deze condensator aan de voorwaarde,

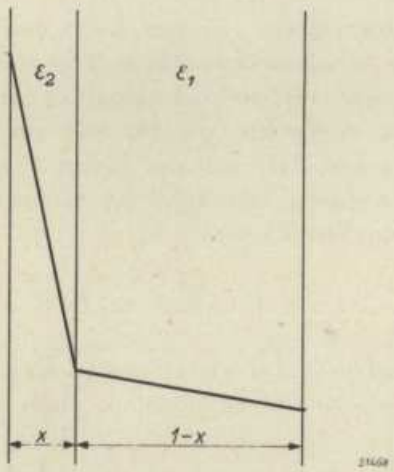


Fig. 1. Schema van het potentiaalverval in een tweelaagscondensator. De dikte der lagen is met xd en $(1-x)d$ aangeduid; de diëlectrische constanten zijn resp. ε_2 en ε_1.

dat overal het product van veldsterkte en ε een constante moet zijn. Het potentiaalverschil V tussen de beide platen wordt dan verdeeld (zie *fig. 1*) in twee stukken V_1 en V_2, zo dat

$$\frac{V_1\varepsilon_1}{(1-x)d} = \frac{V_2\varepsilon_2}{xd} = \frac{V\varepsilon}{d}, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

waarin ε de schijnbare diëlectrische constante van het geheel is. Daar $V = V_1 + V_2$, volgt uit (1) de betrekking

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1-x}{\varepsilon_1} + \frac{x}{\varepsilon_2}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Indien men $\varepsilon_1 = 110$ en $\varepsilon_2 = 5$ stelt, dan vindt men in afhankelijkheid van x de volgende waarden van ε:

x	ε
0,000	110
0,005	99
0,01	91
0,05	54
0,10	36

Men ziet hieruit hoe geringe bijmengsels, althans volgens de aangegeven vereenvoudigde voorstelling, de waarde van ε sterk doen dalen. Verontreinigingen van de orde van grootte van 0,5% brengen deze reeds beneden de 100. In het algemeen zullen dergelijke verontreinigingen in de uitgangsmaterialen aanwezig zijn of bij de verdere bewerkingen erin kunnen geraken. Kleine luchtspleten tussen de kristalletjes van de gesinterde massa of ingesloten holten hebben (omdat dan $\varepsilon_2 = 1$ is) een nog sterker effect. Hieruit volgt, dat de waarde van ε slechts bij het nemen van heel veel voorzorgen tot 100 of nog iets hoger zal stijgen.

Het is nauwelijks te verwachten, dat de betrekking (2) de invloed van bijmengsels of luchtinsluitingen op de waarde van ε bij titaandioxydemateriaal kwantitatief juist zal weergeven, daar wij zijn uitgegaan van een zeer vereenvoudigde voorstelling, die in het algemeen zeker niet gerealiseerd zal zijn. Het is echter mogelijk op overeenkomstige wijze betrekkingen af te leiden voor andere, iets gecompliceerdere voorstellingen, bijv. die waarbij het ene medium in de vorm van ellipsoïdevormige deeltjes, die naar alle richtingen willekeurig georiënteerd zijn, is ingesloten in het andere [2]). De voor dit geval geldende betrekking kan men dan gemakkelijk vereenvoudigen voor bolvormige deeltjes of voor min of meer plaatvormige deeltjes (waarbij dus één dimensie van de ellipsoïde klein is ten opzichte van de andere afmetingen) of voor naaldvormige deeltjes (waarbij één dimensie groot is ten opzichte van de beide andere). Men mag verwachten, dat dergelijke voorstellingen beter bij de werkelijkheid aansluiten.

Ons interesseert in het bijzonder het geval, dat de tweede stof in de vorm van plaatvormige deeltjes voorkomt. Indien titaandioxyde met een kleine hoeveelheid van een tweede fase verontreinigd is, kan men nl. in het algemeen verwachten, dat deze zich aan de kristalgrenzen zal ophopen en zodoende

[2]) D. Polder en J. H. van Santen, Physica **12**, 257-271, 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

enige gelijkenis zal vertonen met plaatvormige deeltjes die een lage diëlectrische constante hebben. Wanneer men voor dit geval de berekening uitvoert en nagaat, welke invloed de bijmengsels op de waarde van ε hebben, dan blijkt, dat nu eveneens betrekkelijk geringe hoeveelheden bijmengsels met een lage diëlectrische constante een buitengewoon sterke verlaging van de schijnbare diëlectrische constante van het titaandioxyde bevattende mengsel ten gevolge hebben.

Nadere beschouwing van de hoge waarde der diëlectrische constante van TiO_2

Wij willen nog iets nader ingaan op de vraag, of wij kunnen inzien, waardoor de diëlectrische constante van titaandioxyde zulk een extreem hoge waarde heeft.

De diëlectrische constante van een stof wordt, zoals bekend, als volgt gedefinieerd: De lading op de platen van een condensator waarvan de ruimte tussen deze platen met een isolerende stof met de diëlectrische constante ε is gevuld, is bij gegeven spanning ε maal zo groot als wanneer de ruimte daartussen leeg is. Deze constante is altijd groter dan 1. De invloed die zulk een medium met $\varepsilon > 1$ heeft op de lading van een condensator, is een gevolg van de omstandigheid, dat het opgebouwd is uit positieve en negatieve ladingdragers, die ten opzichte van elkander kunnen verschuiven, maar die elastisch gebonden zijn aan hun evenwichtsposities.

Bij een stof als TiO_2 moeten we met twee mogelijkheden rekening houden. In de eerste plaats is de chemische binding van sterk polaire aard, zodat we TiO_2 in eerste benadering opgebouwd kunnen denken uit Ti^{4+}-ionen en O^{2-}-ionen, welke in een electrisch veld over een geringe afstand ten opzichte van elkaar kunnen verschuiven. Bovendien is elk ion zelf weer opgebouwd uit een positief geladen kern, omringd door een wolk van negatief geladen electronen; ook deze zullen in een electrisch veld enigszins ten opzichte van elkaar verschuiven.

In een homogene stof ontstaat in elk volume-elementje dv dientengevolge een dipoolmoment Pdv, dat gelijk is aan het product van de verschoven lading en de afstand waarover de negatieve lading ten opzichte van de positieve verschoven is. Het dipoolmoment per cm³ (de polarisatie P) is gelijk aan nul voor $\varepsilon = 1$ en evenredig met $\varepsilon - 1$. Voorts is voor niet te sterke velden de verschuiving der ladingen evenredig met het aangelegde veld E. Men vindt de betrekking:

$$P = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} E \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

De grootte van de polarisatie en dus ook die van de diëlectrische constante van het materiaal, hangt nauw samen met de mate, waarin de bovengenoemde ladingsverschuiving in het electrische veld plaats vindt.

De atomaire eigenschap die de ladingsverschuivingen in het atoom bepaalt, noemt men de polariseerbaarheid van het atoom. Laten we eerst aannemen, dat deze alleen werkzaam is. Wanneer we een stof beschouwen, die uit één enkele soort atomen is opgebouwd, dan werkt op elk atoom hetzelfde electrische veld. Stel dat de grootte van dit veld ter plaatse van het atoom gelijk aan F is, dan is het in het atoom opgewekte dipoolmoment μ evenredig met F en met de polariseerbaarheid α, zodat men heeft:

$$\mu = \alpha F.$$

Indien we het aantal atomen per cm³ N noemen, dan is de polarisatie

$$P = N\mu = N\alpha F \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

De ter plaatse van een atoom werkzame veldsterkte is echter niet identiek met de uitwendig aangelegde veldsterkte, omdat de in de overige atomen opgewekte dipolen nog een extra veld veroorzaken. Het verband tussen F en E is voor een omringing van kubische symmetrie gegeven door de betrekking:

$$F = E + \frac{4\pi}{3} \cdot P,$$

(afgeleid door Lorentz), zodat men met behulp van formule (3) onmiddellijk vindt:

$$F = E + \frac{\varepsilon - 1}{3} \cdot E = \frac{\varepsilon + 2}{3} \cdot E \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

Door eliminatie van P en F uit (3), (4) en (5) vinden we ten slotte:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} N\alpha \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Wij hebben de formules (3)-(6) gegeven in electrostatische eenheden. In de eenheden van het gerationaliseerde Giorgistelsel [3]) zou dit gedeelte er als volgt uitzien.

Uit de formule

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E + P,$$

waarin ε_0 de (absolute) diëlectrische constante van het vacuum en ε_r de (relatieve) diëlectrische constante van het materiaal voorstelt, volgt

$$P = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3')$$

[3]) Zie bijv. W. de Groot, Philips techn. T. **10**, 55-60, 1948 (No. 2), en P. Cornelius, Philips techn. T. **10**, 79-86, 1948 (No. 3)

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In het plaatselijke veld F is het dipoolmoment

$$\mu = \alpha F,$$

waarin α weer de polariseerbaarheid voorstelt, maar nu zoals straks zal blijken, een andere physische dimensie heeft. Is N het aantal atomen per m³, dan is

$$P = N\mu = N\alpha F \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4')$$

De betrekking tussen E, F en P luidt nu

$$\varepsilon_0 F = \varepsilon_0 E + \frac{1}{3} P,$$

waaruit in verband met (3') volgt:

$$F = E + \frac{\varepsilon_r - 1}{3} E = \frac{\varepsilon_r + 2}{3} E \quad \ldots\ldots \quad (5')$$

Door eliminatie van P en F uit (3'), (4') en (5') vindt men [4])

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} N\alpha \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6')$$

Duidt men de grootheid α/ε_0 aan met α', dan kan men (6') ook schrijven in de vorm

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{1}{3} N\alpha' \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6'a)$$

De grootheid α' heeft, evenals α in (4) en (6), de dimensie van een volume. Daarentegen heeft α in (4') en (6') de dimensie

$$\text{A·sec·m} : \text{V/m} = \text{A·sec·m}^2/\text{V}$$

Duiden wij de grootheid α in (4) en (6) aan met α_{ese}, dan is

$$\alpha' \ldots (\text{m}^3) = 4\pi \cdot 10^{-6}\, \alpha_{ese} = 1{,}26 \cdot 10^{-5}\, \alpha_{ese} \ldots (\text{cm}^3)$$

en

$$\alpha \ldots (\text{A·sec·m}^2/\text{V}) = \frac{10}{c^2}\, \alpha_{ese} = 1{,}11 \cdot 10^{-16}\, \alpha_{ese} \ldots (\text{cm}^3)$$

(c = lichtsnelheid in m/sec = $2{,}99776 \cdot 10^8$).

Het tweede lid van de vergelijking (6) noemen we p_e, waarbij de index e aanduidt, dat de electronen in het atoom verschoven zijn. Uit de afgeleide betrekking volgt dan, dat de diëlectrische constante bepaald wordt door een grootheid p_e, die zowel met het aantal atomen N per cm³ als met hun polariseerbaarheid α evenredig is. Bij een stof als TiO_2, opgebouwd uit twee soorten van atomen, wordt p_e bepaald door de polariseerbaarheid van het Ti^{4+}-ion en het O^{2-}-ion gezamenlijk. Dan is N het aantal TiO_2-„moleculen" per cm³ en α de som der polariseerbaarheden van de afzonderlijke atomen. De hier bedoelde diëlectrische constante, die uitsluitend bepaald is door de verschuiving van de electronen in de atomen ten opzichte van de kern, kunnen wij meten met een wisselveld van zo hoge frequentie, dat de verschuiving van de ionen ten opzichte van elkaar daarbij niet plaats grijpt. Hiervoor komen electromagnetische golven met een frequentie hoger dan ongeveer 10^{13}, dus bijv. zichtbaar licht, in aanmerking. Daarbij kunnen we dan gebruik maken van de betrekking van Maxwell:

$$\varepsilon_{opt} = n^2,$$

waarin n = de brekingsindex van de stof, die ε_{opt} als optische diëlectrische constante heeft.

Omgekeerd kunnen we van de brekingsindex uitgaan om een denkbeeld te krijgen van de grootte van p_e en van α. Voor TiO_2 is de gemiddelde waarde van n ongeveer 2,74. Wat de electronenbijdrage tot de polariseerbaarheid betreft, zou TiO_2 dus reeds een ε_{opt} van 7,5 moeten hebben. Passen we hierbij formule (6) toe [5]), dan vinden we voor p_e een waarde van $6{,}5/9{,}5 = 0{,}68$.

We moeten nu bovendien nog de polarisatie in aanmerking nemen, die een gevolg is van de verschuiving van de ionen ten opzichte van elkaar. Daarbij kunnen we op overeenkomstige wijze een grootheid p_i definiëren, zodat

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = p = p_e + p_i.$$

Het is dan gemakkelijk in te zien, dat voor een stof als TiO_2, waarvan de brekingsindex reeds een betrekkelijk hoge waarde bezit, de bijdrage van p_i tot de totale waarde van p, in verhouding tot p_e, slechts klein behoeft te zijn om een hoge waarde van ε op te leveren. Want voor $p = 1$ zou de waarde van ε reeds oneindig groot worden. Uit de experimenteel gevonden waarde $\varepsilon = 110$ volgt, dat voor titaandioxyde $p = 0{,}97$ is, zodat de maximumwaarde $p = 1$ reeds zeer dicht benaderd wordt. Voor de bijdrage van de ionenverschuiving vinden we nu $p_i = 0{,}29$, wat in vergelijking met de polariseerbaarheid van andere ionenkristallen een normale waarde is.

Onze conclusie is, dat de hoge diëlectrische constante van titaandioxyde het gevolg is van de combinatie van een hoge waarde van de brekingsindex n en een niet te lage waarde van de grootheid p_i.

De diëlectrische verliezen van titaandioxyde; invloed van bijmengsels

Nu gebleken is, dat zuiver TiO_2 een hoge ε heeft en bijmengsels deze waarde sterk doen dalen, ligt het voor de hand, er naar te streven deze stof zo zuiver mogelijk te bereiden en dan als keramisch materiaal te verwerken. Zo eenvoudig is deze zaak echter niet. Bij het bereiden en verwerken van zuiver TiO_2 stuit men op allerlei moeilijkheden, waarbij ook in aanmerking moet worden

[4]) Zie bijv. R. W. Pohl, Elektrizitätslehre, Springer, Berlin 1943 (p. 58).

[5]) Weliswaar is dit strikt genomen niet juist, aangezien in het kristalrooster van TiO_2 niet voldaan is aan de voorwaarde, dat elk ion een omringing van kubische symmetrie heeft. Het is echter nog wel mogelijk deze betrekking bij benadering toe te passen, vooral omdat we hier de gemiddelde waarde van n^2 (gemiddeld over de drie kristalrichtingen) gebruiken. De afwijkingen zijn niet zo groot dat de getrokken conclusie daardoor wordt aangetast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

genomen, dat een hoge waarde van ε niet de enige voorwaarde is die aan isolerend materiaal gesteld moet worden. Het zal blijken, dat men vaak genoodzaakt is aan het titaandioxyde opzettelijk bijmengsels toe te voegen.

Wanneer men TiO_2 als grondstof voor condensatoren gebruikt, dan is het zonder twijfel van veel belang dat ε een hoge waarde heeft, maar het is evenzeer van betekenis, dat de diëlectrische verliezen voldoende laag zijn. In het bijzonder moet hierop gelet worden, wanneer de condensatoren gebruikt worden in ketens met wisselstromen van hoge frequentie. Het is gebruikelijk de grootte der diëlectrische verliezen aan te geven met de waarde van tg δ, waarbij δ de zg. verlieshoek voorstelt. Aan het materiaal waar condensatoren, bestemd voor hoge frequenties, van gemaakt worden, zal men de eis stellen, dat tgδ niet hoger dan 10^{-4} tot 10^{-3} is [6]).

Behoorlijk zuiver titaandioxyde-materiaal heeft een hoge ε, maar ontoelaatbaar grote diëlectrische verliezen. Dit hangt o.a. samen met de hoge sintertemperatuur van deze stof en de grote neiging van TiO_2 om bij deze temperatuur zuurstof af te geven en dan over te gaan in lagere oxyden zoals Ti_2O_3, die halfgeleidend [7]) zijn en dus als diëlectricum onbruikbaar. Een kleine hoeveelheid van deze lagere oxyden, welke te gering is om ze chemisch-analytisch aan te tonen, is reeds voldoende om de verliesfactor tg δ ver boven de gestelde grens te brengen. De genoemde reductie treedt des te sterker op, naarmate het omgevende gas tijdens de verhitting minder zuurstof en meer reducerende bestanddelen bevat.

De aanwezigheid van deze bestanddelen is moeilijk te vermijden. Het smeltpunt van titaandioxyde is wegens de zoëven genoemde ontleding niet precies bekend, maar het ligt zeker hoger dan ongeveer 1700 °C. Voor het dichtsinteren van het materiaal (dat immers dicht bij het smeltpunt geschiedt) is dan ook een temperatuur van ongeveer 1500 °C nodig. Dergelijke hoge temperaturen kan men in de ovens van grote afmetingen, die in de keramische techniek gebruikelijk zijn, het beste met gasverwarming bereiken. Het is wel te begrijpen, dat het dan uiterst moeilijk is te voorkomen dat in de verhittingsruimte reducerende gassen aanwezig zijn. Bij de verhitting van het titaandioxyde-materiaal in een gasoven zal dan ook gewoonlijk een vrij aanzienlijke reductie optreden.

Om de invloed hiervan tegen te gaan kan men aan het titaandioxyde bijmengsels toevoegen. Verschillende daarvan, zoals klei, hebben het effect, dat zij de sintertemperatuur van de massa verlagen. Als gevolg hiervan zal de vorming van lagere oxyden veel minder gemakkelijk plaats grijpen. Bovendien hebben sommige toevoegingen de neiging de reductie op zichzelf te verminderen. Zo wordt bereikt, dat men een grondstof krijgt, waarbij de verliesfactor beneden de gestelde grens blijft. Maar tegelijkertijd is ε dan belangrijk, tot 60 à 80, gedaald. Er moet naar gestreefd worden een samenstelling en een bereidingsmethode van het keramische materiaal te vinden, waarbij ε en tg δ beide een gunstige waarde krijgen. Het is gebleken, dat dit in sommige gevallen mogelijk is door de reductie, die bij het sinteren optreedt, ongedaan te maken door heroxydatie bij een geschikte wijze van afkoeling. Men kan dit doen door een nieuwe verhitting op een iets lagere temperatuur (ca 1200 °C) in lucht en ook, nog eenvoudiger, door na de normale sinterende verhitting de voorwerpen die uit titaandioxyde vervaardigde zijn, langzaam te laten afkoelen. Men doorschrijdt op deze wijze een temperatuurgebied waarbij de zuurstofdissociatiedruk van het materiaal voldoende klein is voor de terugvorming van stoechiometrisch zuiver titaandioxyde en anderzijds de reactiesnelheid nog voldoende groot is om deze terugvorming ook inderdaad in enige minuten volledig te doen geschieden. Uit het feit, dat door de twee genoemde maatregelen het gewenste resultaat niet altijd, resp. niet in voldoende mate bereikt werd, volgt echter, dat de bovengenoemde partiële reductie niet de enige bron is van een hoge verliesfactor.

Er bestaat geen zekerheid over de oorzaak van de diëlectrische verliezen die optreden in zo zuiver mogelijk TiO_2, nadat voor volledige heroxydatie gezorgd is. Het is echter mogelijk gebleken deze verliezen door verdere bijzondere voorzorgen tijdens de verwerking van het product in sterke mate te beperken. De eerste methode daartoe is een snelle afkoeling na de sinterende verhitting en de daarop volgende heroxydatie tot stoechiometrisch TiO_2. Dit betekent, dat men het product na de sintering eerst langzaam afkoelt tot ca 1100 °C en daarna het tweede gedeelte van de afkoeling snel doet geschieden.

Het feit, dat wij bij toepassing van deze methode materiaal met een lage verliesfactor kregen, doet vermoeden, dat de zoëven genoemde diëlectrische verliezen (die na de volledige heroxydatie nog aanwezig bleken) samenhangen met verontreinigingen

---

[6]) Ter vergelijking vermelden we de globale waarden van tg δ voor enige niet-keramische isolerende materialen: mica $1 \cdot 10^{-4}$, eboniet $81 \cdot 10^{-4}$, papier $140 \cdot 10^{-4}$, celluloid $450 \cdot 10^{-4}$.

[7]) Zie hierover het artikel: E. J. W. Verwey, Electronengeleiding in niet-metallische stoffen, in Philips techn. T. **9**, 47-54, 1947 (No. 2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in het materiaal. Een nader onderzoek heeft inderdaad geleerd, dat sporen van de alkalimetalen (Na, K) of vooral van de aardalkalimetalen (Ca, Ba) een zeer ongunstige invloed uitoefenen op de diëlectrische verliezen.

Toen dit gevonden was, kon nog een tweede methode toegepast worden om de verliesfactor beneden de gestelde grens te brengen. Men gaat dan uit van zo zuiver mogelijk titaandioxyde, waarin het gehalte van de genoemde schadelijke oxyden tot een technisch bereikbaar minimum beperkt is en waarbij men bovendien de werking van de nog aanwezige schadelijke oxyden door toevoeging van geringe hoeveelheden van andere oxyden geneutraliseerd heeft. Men zou hiertegen kunnen aanvoeren, dat toch, zoals boven gebleken is, enige tienden procent verontreinigingen de diëlectrische constante van TiO_2 van 110 tot beneden 100 kunnen doen dalen. In de practijk heeft deze tweede methode niettemin tot gunstige resultaten geleid. Door namelijk uit te gaan van een naar technische maatstaven zeer zuiver TiO_2, waardoor men de eventuële toevoegingen tot minimale hoeveelheden kan beperken, gelukt het titaandioxyde met een ε van 100 à 105 en een tg δ van hoogstens enige malen 10^{-4} (bij een frequentie van 1500 kper/sec) technisch te realiseren.

Het is van belang nog op te merken, dat men bij toepassing van de laatste methode een keramisch materiaal kan verkrijgen, dat niet alleen bij een frequentie van 1500 kper/sec, maar ook reeds bij 10 kper/sec een lage verliesfactor heeft. Indien men werkt met TiO_2 waaraan hoge percentages klei zijn toegevoegd, dan zal men in het gunstigste geval bij 1500 kper/sec lage diëlectrische verliezen bereiken, maar bij 10 kper/sec zullen deze groot zijn. Dit wordt nader toegelicht in *fig. 2*, waar voor beide gevallen tg δ als functie van de frequentie getekend is.

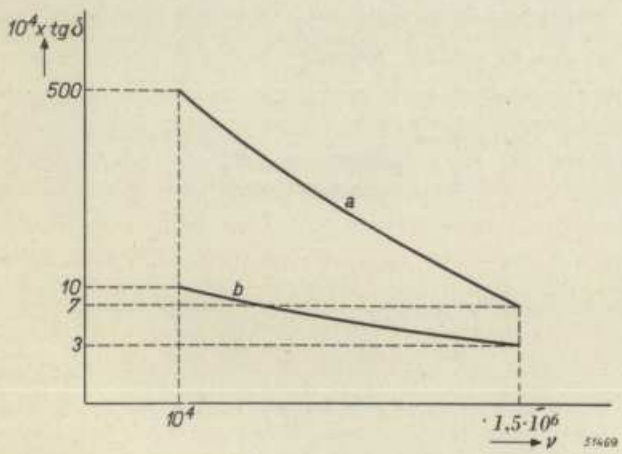


Fig. 2. De waarde van tg δ als functie van de frequentie van de gebruikte wisselstroom. Op de horizontale en de verticale as zijn volgens een logarithmische schaal resp. de frequentie ν van de wisselstroom in per/sec en de waarde van tg δ uitgezet. Kromme *a* heeft betrekking op titaandioxyde waaraan een belangrijk percentage klei is toegevoegd, kromme *b* op technisch zuiver TiO_2, waarbij men de onvermijdbare verontreinigingen met oxyden van alkali- of aardalkalimetalen heeft geneutraliseerd door geringe hoeveelheden van andere oxyden.

De temperatuurcoëfficient van de diëlectrische constante van TiO_2

Indien men door samenstelling en bereidingswijze van het keramische materiaal er zorg voor heeft gedragen, dat het eindproduct een hoge waarde van ε en een kleine tg δ bezit, moet men ten slotte nog aandacht schenken aan de temperatuurcoëfficient van de diëlectrische constante. Bij titaandioxyde is de waarde van ε in sterke mate van de temperatuur afhankelijk. Merkwaardig is, dat de hierbij geldende temperatuurcoëfficient, in tegenstelling met die van bijna alle andere materialen, negatief is, nl. $1/\varepsilon \cdot d\varepsilon/dT = -8 \cdot 10^{-4}$. Dit betekent, dat door een temperatuurstijging van 12,5 °C de capaciteit van een condensator waarbij TiO_2 als diëlectricum gebruikt is, 1% daalt.

Voor sommige toepassingen is deze grote coëfficient een nadeel. Men denke bijv. aan een condensator die in een afstemkring van een radio-apparaat opgenomen is en bij kamertemperatuur ingesteld wordt. Wanneer deze na enige tijd bij de bedrijfstemperatuur een andere capaciteit krijgt, verloopt de afstemming. Hier staat tegenover, dat in andere gevallen de grote negatieve temperatuurcoëfficient een voordeel biedt, omdat daardoor soms de temperatuurcoëfficienten van andere onderdelen van de stroomkring, die in het algemeen een tegengesteld teken bezitten, gecompenseerd kunnen worden.

Men kan zich afvragen, hoe de temperatuurcoëfficient van de diëlectrische constante samenhangt met andere eigenschappen van titaandioxyde. Volgens vergelijking (6) zal de temperatuurcoëfficient van ε bepaald worden door die van $N\alpha$. Nu is het duidelijk, dat ten gevolge van de thermische uitzetting het aantal atomen per cm^3 bij temperatuurverhoging kleiner wordt en dat daardoor de diëlectrische constante met stijgende temperatuur moet afnemen. Deze invloed kan tegengewerkt worden door de verandering van α met T. Bij een stof als TiO_2 blijkt echter, dat de met behulp van de niet geheel exacte formule (6) berekende waarde van α zeer weinig van de temperatuur afhangt, zodat de temperatuurcoëfficient van ε vrijwel geheel door de thermische uitzetting bepaald wordt. Een geringe verandering van N heeft bij grote waarden van ε een betrekkelijk grote verandering van ε ten gevolge, zoals blijkt uit het verband tussen deze grootheden,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dat verg. (6) aangeeft. De grote temperatuurcoëfficient hangt bij TiO_2 dan ook direct samen met de hoge waarde van ε.

Voor het bij TiO_2 bij benadering gerealiseerde geval dat $d\alpha/dT \approx 0$ kan men uit de formule (6) afleiden dat

$$\frac{1}{\varepsilon}\cdot\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon+2)}{3\varepsilon}\cdot\frac{1}{N}\cdot\frac{dN}{dT} \quad \ldots\ldots (7)$$

Door een gemiddelde lineaire uitzettingscoëfficient

$$\beta = -\frac{1}{3N}\cdot\frac{dN}{dT}$$

in te voeren, kan men (7) ook schrijven als

$$\frac{1}{\varepsilon}\cdot\frac{d\varepsilon}{dT} = -\frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon+2)}{\varepsilon}\beta \quad \ldots\ldots (8)$$

hetgeen bij hoge waarden van ε overgaat in

$$1/\varepsilon \cdot d\varepsilon/dT = -\beta\varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

De temperatuurcoëfficient is dus voor een dergelijke stof negatief en evenredig met de gemiddelde lineaire uitzettingscoëfficient.

Wij wijzen er echter nogmaals op, dat er ook vele stoffen zijn, vooral met lagere diëlectrische constanten, waarbij ook de verandering van α met de temperatuur een rol speelt.

We hebben er reeds op gewezen, dat bij vele toepassingen de grote negatieve temperatuurcoëfficient nadelig is. Door geschikte toevoegingen van stoffen met een positieve temperatuurcoëfficient is het mogelijk een mengsel te krijgen waarvan de temperatuurcoëfficient klein of nul is; maar dit gaat steeds ten koste van de hoge waarde van ε, zoals men kan verwachten op grond van de beschouwingen die in het begin van dit artikel gegeven zijn. Van het samenstellen van zulke keramische massa's zullen we enige voorbeelden noemen.

Reeds vele jaren is de toevoeging van MgO bekend. Bij de sinterende verhitting krijgt men dan een materiaal dat gedeeltelijk uit een magnesiumtitanaat bestaat. Bij juist gekozen samenstelling wordt $1/\varepsilon \cdot d\varepsilon/dT$ practisch gelijk 0. Deze materialen vertonen zeer lage diëlectrische verliezen ($\mathrm{tg}\,\delta = 1\cdot10^{-4}$ bij 1000 kper/sec), maar de diëlectrische constante is niet meer dan 12 à 18.

Volgens een andere methode voegt men speksteen toe. Ook daarbij kan men een temperatuurcoëfficient 0 bereiken met behoud van zeer lage verliezen, doch ε is dan gedaald tot ca 10.

Een manier, die men speciaal bij Philips heeft uitgewerkt, is het gebruik van CeO_2 als bijmengsel. Gevonden werd namelijk, dat de diëlectrische constante van CeO_2 nog vrij hoog, ca 35, is, terwijl de temperatuurcoëfficient daarvan, enigszins afhankelijk van de zuiverheid van het oxyde, in het algemeen zwak positief is [8]). Wil men uit $CeO_2 + TiO_2$ materialen bereiden met een temperatuurcoëfficient die ongeveer 0 is, dan zal dientengevolge het mengsel een belangrijke overmaat van CeO_2 moeten bevatten. Men gebruikt hiertoe bijv. een mengsel van 85 mol% CeO_2 en 15 mol% TiO_2. Dit mengsel wordt gemakkelijk dichtgesinterd bij 1220 °C, hetgeen een belangrijk lagere temperatuur is dan die welke voor zuiver TiO_2 nodig is. De waarde van de diëlectrische constante is ongeveer 40 en tg δ is ca $8\cdot10^{-4}$ bij 1000 kper/sec.

Een andere werkwijze, die wij hebben onderzocht, bestaat in de verwerking van SnO_2. Voor 50 mol% SnO_2 en 50 mol% TiO_2 is de temperatuurcoëfficient ongeveer 0. Het is waar, dat men zeer hoog moet stoken (1550 °C), maar de gevonden verliezen zijn dan uiterst gering ($\mathrm{tg}\,\delta \approx 1\cdot10^{-4}$ bij 1000 kper/sec), terwijl bij de gegeven mengverhouding $\varepsilon = 25$ is.

Als laatste mogelijkheid noemen we nog de toevoeging van ZrO_2. Daarbij kan men op verschillende manieren te werk gaan. In de eerste plaats is het mogelijk slechts enkele procenten zirconiumoxyde

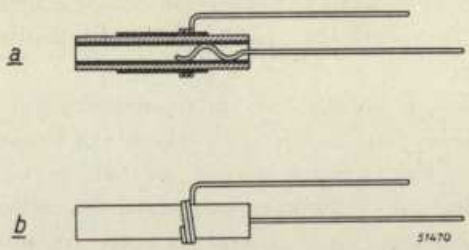


Fig. 3. Een keramische condensator van het type A; *a* in doorsnede, *b* van ter zijde gezien. De lengte variëert van 15 tot 40 mm, de capaciteit van 33 tot 1200 pF. Twee zilverlaagjes vormen de bekleedsels. De toevoerdraad wordt aan het binnenkleedsel bevestigd door deze in spiraalvorm in het keramische buisje te drukken.

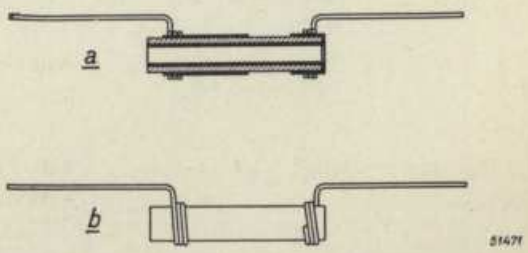


Fig. 4. Een keramische condensator van het type B; *a* in doorsnede, *b* van ter zijde gezien. De afmetingen en de capaciteiten zijn dezelfde als bij type A. Hier kan men aan de buitenzijde van het keramische buisje de toevoerdraad in contact brengen met het binnenbekleedsel.

[8]) De spreiding hangt o.a. samen met de verliezen. Volgens de regel van Gevers en Du Pré (zie Philips techn. T. 9, 91-96, 1947, No. 3) is de bijdrage tot de temperatuurcoëfficient welke samenhangt met de diëlectrische verliezen, bij dit soort van materialen ongeveer gelijk aan 0,06 tg δ; bij een tg δ van 10^{-3} dus $+0{,}6\cdot10^{-4}$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toe te voegen. Dan is $\varepsilon \approx 60$ en $\operatorname{tg}\delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ bij 1000 kper/sec; maar $1/\varepsilon \cdot d\varepsilon/dT$ is dan nog sterk negatief ($-6 \cdot 10^{-4}$). In de tweede plaats kan men zoveel ZrO_2 toevoegen, dat $1/\varepsilon \cdot d\varepsilon/dT \approx 0$ is. Men vindt dan voor de diëlectrische verliezen dezelfde waarde, maar ε is gedaald tot de orde van 30. In het laatste geval moet een hoge sintertemperatuur toegepast worden.

Uit deze voorbeelden blijkt, dat men door de samenstelling te variëren keramische materialen met zeer verschillende diëlectrische eigenschappen kan verkrijgen. Op grond van de gevonden resultaten moet men van geval tot geval de samenstelling kiezen in verband met de eisen die aan het product gesteld worden.

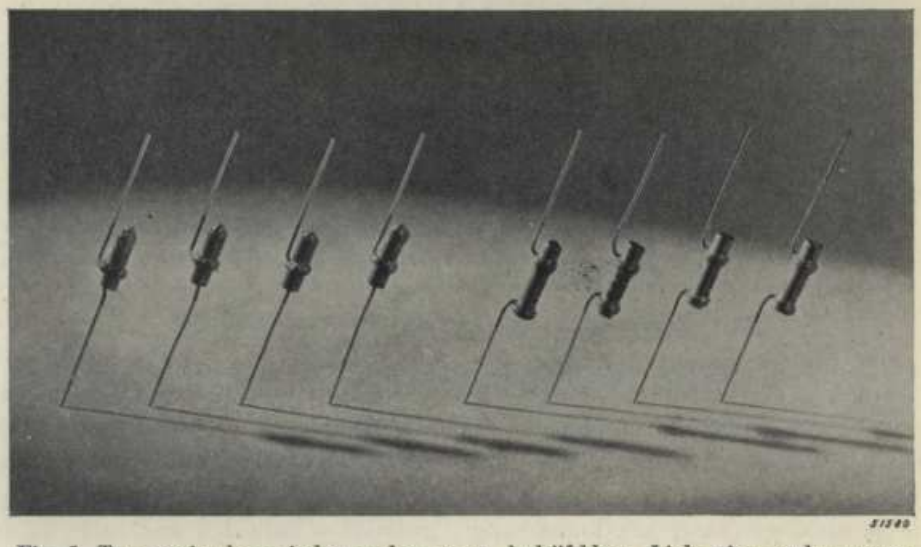


Fig. 5. Twee series keramische condensatoren, bedrijfsklaar. *Links* vier condensatoren van de uitvoering A, *rechts* vier exemplaren van het type B.

Een toepassing van keramisch materiaal voor condensatoren

We besluiten dit artikel met te verwijzen naar een toepassing van keramisch materiaal voor Philips-condensatoren. Het betreft een serie condensatoren van kleine afmetingen, waarvoor in verband met de verlangde capaciteit een diëlectricum met een hoge diëlectrische constante nodig was. Uit de *figuren 3* en *4* blijkt hoe deze condensatoren uitgevoerd zijn.

Deze keramische condensatoren worden vervaardigd met capaciteiten van 33 tot 1200 pF en hebben een lengte van 15 tot 40 mm [9]). Men beschikt over uitvoeringen met verschillende toleranties, nl. van 20, 10, 5 en 1 %, doch met een maximale nauwkeurigheid van $\pm$ 1 pF. De gebruiksspanning is maximaal 600 V, hoewel iedere condensator in de fabriek beproefd wordt met 1500 V wisselspanning van 50 per/sec gedurende 1 uur. Voor de diëlectrische verliezen geldt als eis, dat $\operatorname{tg}\delta$ voor de ene uitvoering (type A) kleiner is dan $20 \cdot 10^{-4}$ (bij 1500 kper/sec) en voor de andere kleiner dan $10 \cdot 10^{-4}$. De isolatieweerstand is groter dan 5000 Megohm. Betreffende de mechanische sterkte kan nog worden medegedeeld, dat men de uiteinden van deze kleine condensatoren met 2 kg kan belasten zonder dat breuk optreedt.

Fig. 5 toont een serie van deze condensatoren. Ze worden gebruikt in radiotoestellen en in andere apparaten met schakelingen voor hoge frequenties.

[9]) Voor de zeer kleine capaciteiten (3,3 tot 27 pF) worden in dezelfde uitvoeringen condensatoren met glas als diëlectricum geleverd. De afmetingen hiervan variëren van 15 tot 30 mm.

Rectificatie.

In het artikel: Een televisie-ontvanger met geprojecteerd beeld, III. De apparatuur voor het opwekken van 25 kV anodespanning, in het Juni-nummer van dit tijdschrift, gelieve men op blz. 160 in de noemer van de formules (3a) en (3b) een factor μ_0 (= de permeabiliteit van het vacuum = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) toe te voegen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN ZENDBUISKOELER MET VERHOOGDE TURBULENTIE VAN HET KOELWATER

door M. J. SNIJDERS.

621.396.694.032.42

Hoewel lucht als koelmiddel voor zendbuizen bepaalde voordelen biedt, is water te verkiezen waar een zo intensief mogelijke koeling wordt verlangd, bijv. in zenders voor zeer korte golven. Het is gebleken dat de normale wijze van koelen aanzienlijk kan worden verbeterd door de turbulentie van het water in de koeler te vergroten. Een doeltreffend middel om hiertoe te komen bestaat hierin dat men het water in de koeler spuit, bijv. met behulp van concentrisch om de anode heen aangebrachte sproeiringen. De hieruit spuitende straaltjes bewerken een heftige beroering in het koelwater. Dergelijke sproeikoelers zijn uitgewerkt voor de buizen type PAW 12/15 en TAW 12/35. De aanleiding hiertoe was de ervaring dat boven een zekere anodetemperatuur (ca 90 °C) op het anode-oppervlak een laag koperoxyde wordt gevormd, die de warmte zo slecht geleidt dat de anode te warm dreigt te worden. Vergelijkt men de sproeikoeler met de oude koeler, bij dezelfde hoeveelheid water per minuut en dezelfde dissipatie, dan blijkt met de eerstgenoemde de hoogste anodetemperatuur ca 40 °C lager te blijven dan met de laatste, en daarmee ruimschoots beneden de critische waarde van 90 °C. De afmetingen van beide koelers zijn gelijk, zodat de sproeikoeler gemakkelijk in bestaande installaties kan worden aangebracht. De betere koeling, die met het sproeisysteem is te bereiken, geeft de mogelijkheid een gegeven zendvermogen op te wekken met kleinere zendbuizen en/of bij kortere golven.

Zendbuizen met een dissipatie boven een bepaalde grens worden in het algemeen kunstmatig gekoeld, hetgeen een aanzienlijke beperking van de buisafmetingen mogelijk maakt. Deze grens ligt bij een dissipatie van ongeveer 3 kW.

In de meeste gevallen geschiedt het kunstmatig koelen door langs de anode, die de vorm van een kan heeft en een deel van de buiswand uitmaakt, water te laten stromen (*fig. 1*). Volgens een andere methode, die vooral de laatste tijd meer naar voren komt, wordt langs de anodekan, die dan van koelribben is voorzien, lucht geblazen. In dit tijdschrift [1]) werd destijds beschreven, hoe een nieuwe vorm van koelribben en een bijzondere wijze van luchtverdeling de mogelijkheid openen, ook de grootste zendbuizen met lucht te koelen. Zoals in het aangehaalde artikel werd besproken, heeft koeling met lucht bepaalde voordelen boven die met water; het lijdt dan ook geen twijfel, of zij zal de laatstgenoemde methode in menig geval gaan vervangen. Dit neemt echter niet weg dat men toch vaak de voorkeur zal blijven geven aan koeling met water. In het bijzonder zal dit het geval zijn, als de buis moet werken bij zeer hoge frequenties, waarbij de verhouding van het afgegeven vermogen tot het gedissipeerde vermogen veel ongunstiger is dan bij lagere frequenties. Bovendien zijn bij zeer hoge frequenties zo klein mogelijke waarden van de capaciteiten gewenst, zowel tussen de electroden van één buis, als tussen de anoden van twee buizen die men, in balansschakeling, compact wil samenbouwen. Een en ander leidt er toe, de afmetingen van de buis en van de koeler zo klein te kiezen als slechts mogelijk is. Wat de buis betreft, voert dit tot hoge waarden van de specifieke belasting (d.i. dissipatie per cm² anode-oppervlakte) en dus tot de noodzaak van een zeer krachtige koeling. Wat de koeler betreft, is hier de koeler met water als koelmiddel wegens zijn kleinere afmetingen in het voordeel tegenover die met lucht. Wil men dus met het ver-

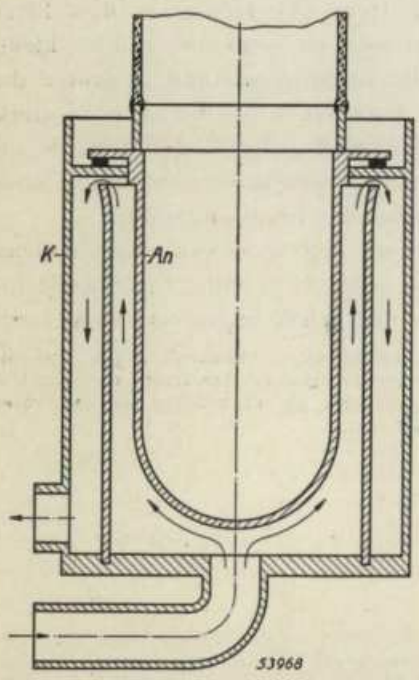


Fig. 1. *An* = anodekan van een zendbuis, geplaatst in een koeler *K*, waar water doorheen stroomt.

[1]) H. de Brey en H. Rinia, Een verbeterde methode voor het koelen van zendbuizen met lucht, Philips techn. T. 9, 172-179, 1947 (No. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mogen het onderste uit de (anode-)kan halen, dan verdient als koelmiddel water de voorkeur.

In het onderstaande willen wij wat nader op het koelen met water ingaan.

Open en gesloten koelsystemen

In een „open" koelsysteem laat men het water, na het te hebben gebruikt, weglopen.

In een „gesloten" koelsysteem wordt het gebruikte, in temperatuur gestegen water in een zg. terugkoeler afgekoeld en opnieuw gebruikt; hier circuleert dus steeds dezelfde hoeveelheid water.

Voor zenders met middelmatig vermogen, waar het waterverbruik niet groot is, kiest men gewoonlijk de eenvoudigste oplossing: het open koelsysteem, ten minste als ter plaatse water van goede kwaliteit beschikbaar is, dwz. water dat in voldoende mate vrij is van bestanddelen die tot afzetting van ketelsteen op de anode zouden leiden (wij komen hierop nog terug). Daar ketelsteen de warmte zeer slecht geleidt, belemmert ze de koeling, waardoor de buis gevaar loopt te heet te worden. Is echter alleen „hard" water verkrijgbaar, dan zal men meestal de voorkeur geven aan een gesloten systeem. Uit het daarin aanwezige koelwater zullen na korte tijd de schadelijke bestanddelen, waaruit ketelsteen ontstaat, verdwenen zijn. Bovendien kan men dan desgewenst ook de aanvankelijke afzetting voorkomen door de koelinrichting te vullen met gedestilleerd water. Slechts wegens het geringe verlies door verdamping en lekkage moet men van tijd tot tijd wat water bijvullen.

Voor grote zenders, waar een waterstroom van bijv. 500 liter per minuut nodig is, zal men bijna altijd tot een gesloten koelsysteem besluiten, wegens het vervallen van de kosten die het verbruik van zuiver water, dat voor een open systeem is vereist, zou meebrengen.

Voor het afkoelen („terugkoelen") van het verwarmde koelwater bestaan verscheidene oplossingen. Bij kleine vermogens gebruikt men wel inrichtingen analoog aan een automobielradiator, bij grotere vermogens koeltorens, koelvijvers, of koelers waarin het circulerende („primaire") koelwater zijn warmte aan stromend „secundair" water afgeeft. Deze laatste oplossing is voorgesteld in *fig. 2*, waarin bij wijze van voorbeeld het gesloten koelsysteem van de grote Nederlandse omroepzenders is geschetst.

Aan de zuiverheid van het secundaire koelwater behoeft men geen hoge eisen te stellen; de practijk bewijst dat er zich in de terugkoeler geen schadelijke stoffen afzetten. Dit is toe te schrijven aan de vrij lage temperatuur van het primaire koelwater (hoogstens 30 °C). Als secundair koelwater kan dus bijv. onzuiver bronwater dienst doen, dat zeer goedkoop is.

Een nog niet vermeld voordeel van het gesloten koelsysteem, indien men daarin gedestilleerd water gebruikt, is het volgende. De anode van de te koelen zendbuis heeft een hoge gelijkspanning ten opzichte van aarde (bijv. 20 kV), waarop een eveneens hoge wisselspanning is gesuperponeerd. Ter wille van de electrische isolatie wordt het koelwater, dat langs de anode stroomt, door lange isolerende

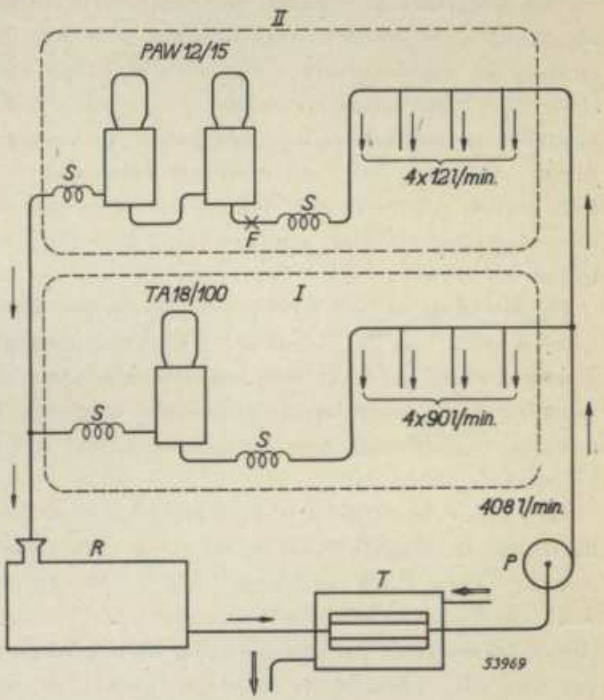


Fig. 2. Voorbeeld van een gesloten koelsysteem, zoals wordt toegepast in de Nederlandse omroepzenders. De loop van het primaire koelwater is met enkele, die van het secundaire koelwater met dubbele pijlen aangegeven. P = pomp, I = eindtrap, II = voortrap, S = spiraalvormige keramische buis (voor electrische isolatie), R = reservoir, T = zg. terugkoeler.

In de genoemde zenders is de eindtrap (I) voorzien van vier buizen TA 18/100, met twee, hier niet getekende, reservebuizen. Bij het in gebruik nemen van deze laatsten wordt het koelwater tegelijk met de electrische verbindingen omgeschakeld. Anders is dit bij de voortrap (II), die met vier buizen PAW 12/15 werkt. Hier is de koeler van elk der werkende buizen in serie geschakeld met de koeler van de bijbehorende reservebuis. In de figuur is één van de vier buizenparen aangegeven. Bij F kan een later te bespreken filter worden opgenomen.

buizen toe- resp. afgevoerd. Deze buizen (bij voorkeur van keramisch materiaal) hebben, met het oog op de plaatsruimte, meestal de vorm van een spiraal (S, fig. 2). Hoewel de buizen zelf niet geleiden, zal er toch een zekere lekstroom vloeien, namelijk door het water dat zich in de buizen bevindt. Dit verlies beperkt men tot een minimum door een gesloten koelsysteem te gebruiken dat gevuld is

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

met gedestilleerd water, waarvan het geleidingsvermogen klein is. Het rendement van de zender wordt hierdoor aanmerkelijk verbeterd.

Lagen die zich op de anode kunnen afzetten

Het gevaar van ketelsteenvorming in een open koelsysteem werd zoëven al genoemd. Men zou na het bovenstaande verwachten dat bij een gesloten koelinrichting met gedestilleerd water van enigerlei afzetting op de anode geen sprake kan zijn. In de practijk blijkt ei echter toch afzetting op te treden, en wel als gevolg van het feit dat het rondstromende water uit de wanden van het circuit stoffen opneemt waaruit zich verbindingen vormen, die zich op de anode afzetten. Zo zal ketelsteen ontstaan, als het rondstromende water in directe aanraking is met beton, bijv. van het in fig. 2 aangegeven reservoir. Zulk een reservoir dient dan ook van binnen geheel te zijn bekleed met een stof als chloorrubberverf, die contact tussen water en beton voorkomt.

De ervaring in een aantal omroepzenders heeft geleerd dat, ook al is deze voorzorgsmaatregel genomen en al gebruikt men gedestilleerd water, de vorming van een warmte-isolerende laag op de anoden — weliswaar geen ketelsteen — niet is uitgesloten.

Met name heeft men geconstateerd dat er een harde zwarte laag ontstaat op de anode van buizen van het type PAW 12/15 en TAW 12/35 (*fig. 3*), welke in verscheidene omroepzenders met een gesloten koelsysteem worden gebruikt. De laag bleek te bestaan uit koperoxyde (CuO). Hoewel dit de warmte niet zo slecht geleidt als ketelsteen, kan de vorming er van toch tot oververhitting van de anode aanleiding geven.

Middelen ter voorkoming van koperoxydevorming

De laag koperoxyde kan van tijd tot tijd door afbeitsen en schuren worden verwijderd, doch zulk een bewerking, met het bijbehorende demonteren en opnieuw monteren, is vrij gevaarlijk voor de buis wegens de kans op breuk (niet alleen van het glas, maar ook van de uit wolfraam bestaande gloeidraad, die op den duur bros wordt).

Men zou het ontstaan van koperoxyde kunnen tegengaan door er voor te zorgen dat althans één der elementen waar het uit bestaat, aan de anode niet aanwezig kan zijn. Wat zuurstof betreft, is dit echter niet goed doenlijk, daar het water op verscheidene plaatsen met lucht in aanraking is (o.a. in het reservoir, zie fig. 2). Nog moeilijker is het, de aanwezigheid van koper te vermijden: de anode zelf is van koper, en bovendien zal uit koperen, messingen of bronzen kranen en andere leidingsonderdelen dit metaal in het water overgaan. Het zou misschien mogelijk zijn door bijv. vertinnen van deze onderdelen en van de anode elk contact tussen koper en water te vermijden. Er is echter een eenvoudiger middel gevonden om de vorming van

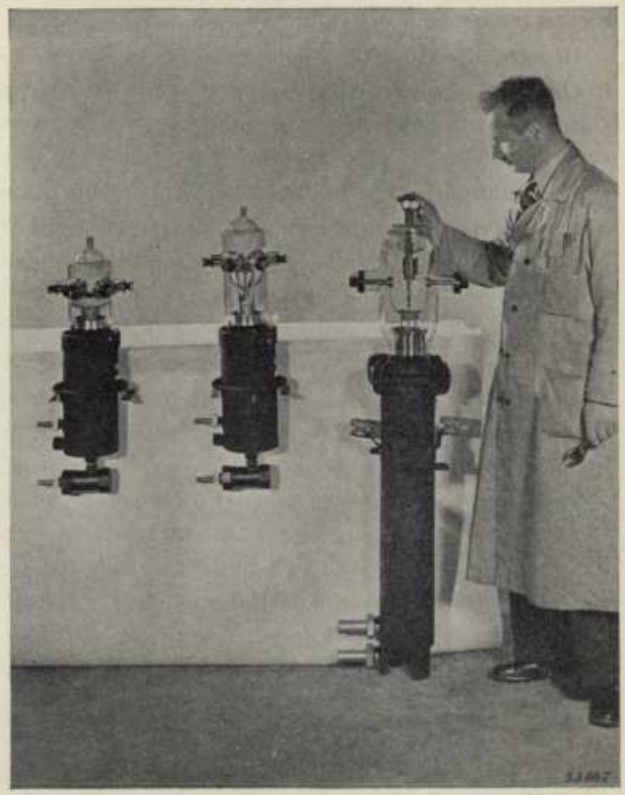


Fig. 3. De drie in dit artikel ter sprake komende zendbuizen. Van links naar rechts: de penthode PAW 12/15, de triode TAW 12/35 en de triode TA 18/100.

koperoxyde op de anodekan te voorkomen, namelijk het verlagen van de anodetemperatuur door intensievere koeling. Hiervoor is een verbeterde koelerconstructie uitgewerkt, die de aanleiding vormde tot dit artikel.

Een aantal feiten wezen er namelijk op, dat bij verlaging van de anodetemperatuur deze vorming langzamer geschiedt, en beneden een zekere temperatuur zelfs zo goed als geheel ophoudt. Deze feiten, geconstateerd in bepaalde omroepzenders, zijn de volgende:

1. Het koperoxyde bleek vooral te ontstaan op de warmste gedeelten van de anode.
2. In zwaar belaste buizen PAW 12/15 werd meer koperoxyde per tijdseenheid gevormd dan in lichter belaste exemplaren.
3. Bij buizen type TA 18/100 (fig. 3), die in dezelfde zender werden gebruikt en met hetzelfde water gekoeld als de genoemde buizen PAW 12/15 (zie fig. 2), deed zich ook bij de zwaarst belaste

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

exemplaren geen afzetting van koperoxyde voor. Nu was de anode van de buizen TA 18/100 minder warm dan die van de buizen PAW 12/15, hetgeen werd vastgesteld door voorlopige metingen met thermo-elementen, die op de anode waren gesoldeerd. Voor de meetresultaten zie *tabel I*. (Om practische redenen werden deze metingen verricht bij statische belasting van de buizen [2]), die zo was gekozen dat dezelfde dissipatie optrad als bij de zwaarst belaste buizen in de zender.)

Hieruit blijkt dat de temperatuur beneden welke de vorming van koperoxyde ophoudt, tussen 55 en 94 °C ligt; volgens latere metingen bedraagt zij ongeveer 90 °C.

Tabel I. Temperatuurmetingen aan zendbuizen. t', t'' = temperatuur van het koelwater aan de ingang resp. uitgang van de koeler, A = koelwaterstroom, P_{tot} = uit $t''-t'$ en A afgeleide totale dissipatie, t_a = met thermo-element gemeten anodetemperatuur (op ongeveer de warmste plaats).

Type	PAW 12/15	TA 18/100
t' (°C)	20	20
t'' (°C)	30	26
A (l/min)	12	90
P_{tot} (kW)	8,4	37,7
t_a (°C)	94	55

De koeling van buizen PAW 12/15 vergeleken met die van buizen TA 18/100

De vraag was nu, hoe ook de anode van de buizen PAW 12/15 op een voldoend lage temperatuur kon worden gehouden.

De verklaring voor het verschil der in tabel *I* genoemde anodetemperaturen is niet hierin gelegen dat in de bedoelde zender de specifieke anodebelasting bij de PAW 12/15 hoger zou zijn geweest dan bij de TA 18/100, want juist het tegendeel is waar: de specifieke belasting bedroeg 23 W/cm² bij de PAW 12/15, en 26 W/cm² bij de TA 18/100.

De oorzaak van het temperatuurverschil wordt echter duidelijk, als we de snelheden van het water in beide gevallen vergelijken. De snelheid v vinden we als quotient van de waterstroom A en de oppervlakte O van de dwarsdoorsnede van de ringvormige watermantel, die de anode omgeeft. Bij beide koelers was O = 10,6 cm²; de waarden van A waren, zoals in tabel *I* vermeld, 12 resp. 90 l/min, d.i. $0{,}2\cdot10^{-3}$, resp. $1{,}5\cdot10^{-3}$ m³/sec. Dus was bij de buis PAW 12/15:

$v = 0{,}2\cdot10^{-3}/10{,}6\cdot10^{-4} = 0{,}19$ m/sec,

en in het geval van de buis TA 18/100:

$v = 1{,}5\cdot10^{-3}/10{,}6\cdot10^{-4} = 1{,}4$ m/sec.

Bij laminaire stroming van een koelvloeistof langs een warme wand komt de warmte-overgang van de wand naar de vloeistof uitsluitend door geleiding tot stand (straling moge hier buiten beschouwing blijven). Daarbij is de coëfficient van warmte-overdracht — d.i. de hoeveelheid warmte die per eenheid van wandoppervlakte, per eenheid van tijd en per graad temperatuurverschil in het koelmiddel overgaat — onafhankelijk van de snelheid van het koelmiddel.

Echter, ook reeds bij de kleinste der beide genoemde snelheden stroomt het water turbulent, dwz. met wervelingen; de volume-elementen van het water bezitten dus, behalve de zojuist berekende axiale snelheid v, een snelheidscomponent in radiale richting, zodat warmere volume-elementen naar koudere plaatsen worden getransporteerd, en omgekeerd. Aan deze radiale component is dus de convectie te danken, ten gevolge waarvan de coëfficient van warmte-overdracht veel groter is dan die welke alleen aan geleiding is toe te schrijven. Bovendien treedt bij turbulentie het verschijnsel op dat ten gevolge van de wervelingen eenzelfde waterdeeltje meermalen met de te koelen wand in aanraking komt en er warmte uit opneemt. Hoe sterker de turbulentie is, des te kleiner de temperatuurverschillen zullen zijn die in radiale richting in de watermantel optreden.

De voor een goede warmte-overdracht zo zeer gewenste radiale snelheidscomponent neemt toe met stijgende axiale snelheid v van het water [3]). De verklaring voor het grote verschil tussen de waarden van t_a bij de buizen PAW 12/15 resp. TA 18/100 moet dan ook worden gezocht in het boven berekende verschil in watersnelheid v.

Men zou bij de buis PAW 12/15 deze snelheid kunnen opvoeren, bijv. door de per minuut doorstromende hoeveelheid water A te vergroten. Zulk een oplossing is echter in verscheidene opzichten oneconomisch. Een andere methode is het verkleinen van de dwarsdoorsnede O; in de practijk echter kan men daarmee niet ver gaan, daar de dikte van de watermantel slechts 3 mm bedraagt en men rekening moet houden met het feit dat de anodekan vaak niet zuiver rond is.

[2]) Bij statische belasting van de buis is de temperatuur ongelijkmatiger over de anode-omtrek verdeeld dan bij dynamische belasting. Wij komen op dit punt terug bij hieronder te beschrijven nauwkeurige metingen. De in tabel I vermelde waarden zijn met minder voorzorgen gemeten.

[3]) Weliswaar minder snel dan evenredig, bijv. in bepaalde gevallen evenredig met $v^{3/4}$; zie A. Schack, Der industrielle Wärmeübergang, Düsseldorf 1940, 2de druk, blz. 60.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het was dus zaak te zoeken naar andere middelen om de turbulentie van het water in de koeler op te voeren.

De sproeikoeler

Een sterke turbulentie kan men verwekken door het water op een geschikte wijze in de koeler te spuiten. *Fig. 4* laat zien hoe deze manier van injecteren kan worden verwerkelijkt: het water, dat

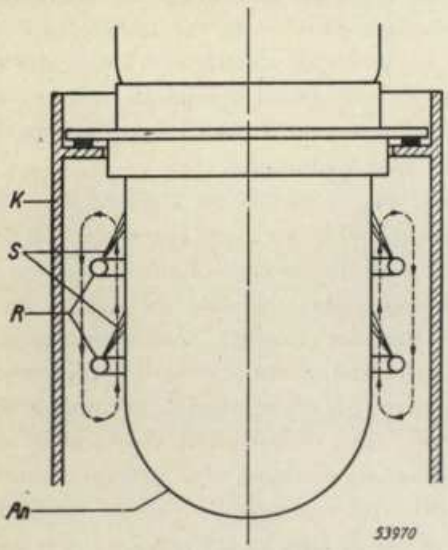


Fig. 4. Principe van de sproeikoeler. R = sproeiringen, waaruit waterstralen S spuiten, die het water heftig in beroering brengen. An = anode, K = koelermantel.

uit enige om de anode heen geplaatste ringvormige sproeibuizen spuit, veroorzaakt in de geheel gevulde koeler een krachtige circulatie, waarvan de gebogen stippellijn met de pijlen de hoofdrichting aangeeft, en die vergezeld gaat van kleinere wervelingen.

Van de definitieve uitvoering van zulk een „sproeikoeler" voor de buis PAW 12/15 geeft *fig. 5* een denkbeeld; een analoge koeler is uitgewerkt voor de buis TAW 12/35. Het toegevoerde water stroomt bij *1* een kanaal binnen dat in de gegoten bronzen bodem is geboord en dat zich in vieren vertakt. Elk dezer takken voert naar een verticale pijp, waardoor het water een drietal sproeiringen bereikt. Bij *5* vloeit het water af. Uitwendig is deze koeler even groot als de oude.

Berekening

Bij het ontwerpen van de nieuwe koeler is er van uitgegaan dat de waterstroom (bij de buis PAW 12/15 is deze 12 l/min, d.i. 200 cm³/sec) ongewijzigd moet blijven, o.a. omdat dan in bestaande installaties deze koeler de oude kan vervangen zonder dat men een grotere pomp behoeft aan te schaffen.

De snelheid v_0 (in m/sec) waarmee het water uit de gaatjes spuit, is gegeven door de formule

$$v_0 = \sqrt{2gh},$$

waarin g = versnelling van de zwaartekracht (in m/sec²) en h = drukverschil (in m waterkolom) tussen voor- en achterzijde van de gaatjes. Was h gelijk aan het totale drukverval in de koeler — waarvoor wij de oude waarde willen aanhouden (h = 1 m bij de buis PAW 12/15) — dan zou de uittreesnelheid bedragen:

$$v_0 = \sqrt{2 \times 9{,}81 \times 1} = 4{,}4 \text{ m/sec}.$$

Daar echter in het overige gedeelte van de koeler ook nog enig drukverval optreedt en h dus iets kleiner dan 1 m is, stellen we $v_0 \approx 4$ m/sec.

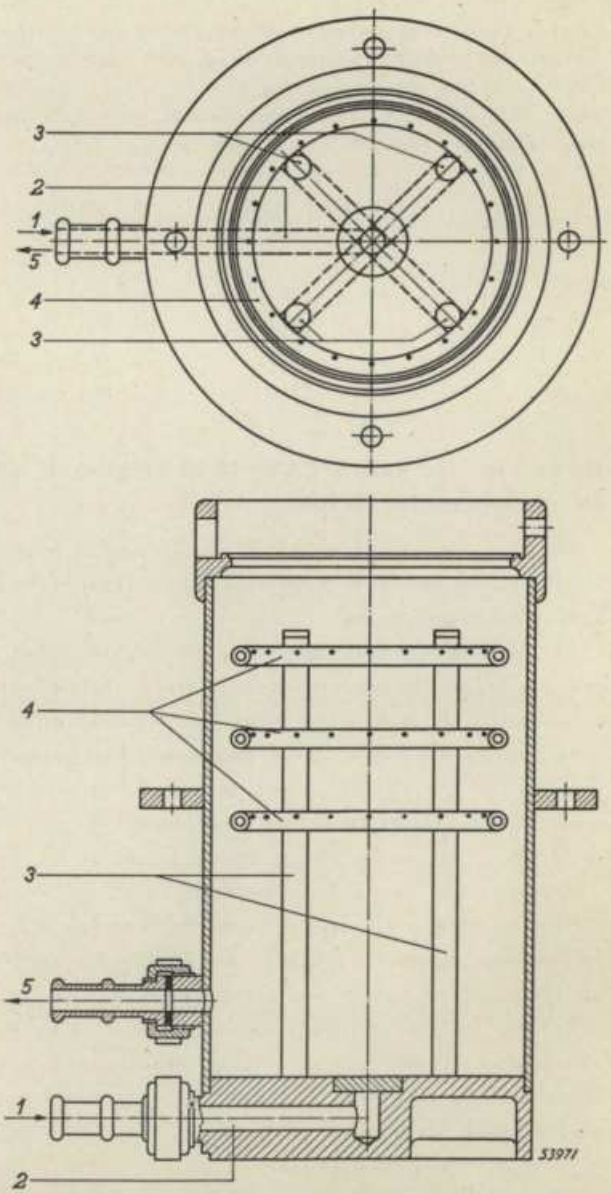


Fig. 5. Bovenaanzicht en verticale doorsnede van de sproeikoeler. Het koelwater komt bij *1* binnen, stroomt door het kanaal *2*, dat zich vertakt naar de vier verticale pijpen *3*, en bereikt zo de drie sproeiringen *4*. Bij *5* verlaat het water de koeler.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Uit de vooropgestelde grootte van de waterstroom volgt nu dat de gaatjes een gezamenlijke oppervlakte van 200/400 = 0,5 cm² moeten hebben.

Het antwoord op de vraag, over hoeveel gaatjes men deze doorsnede het beste kan verdelen, wordt beheerst, enerzijds door het feit, dat een groot aantal (kleine) gaatjes gunstig is om de koeling

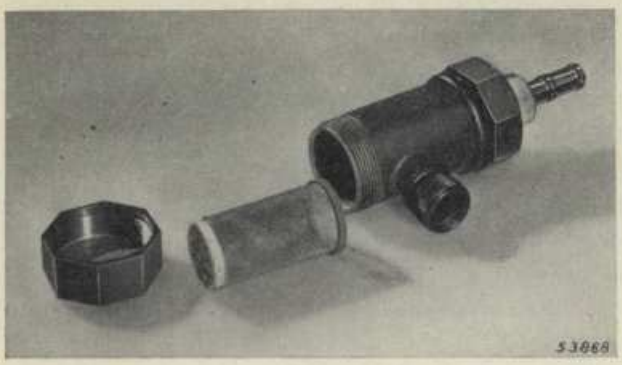


Fig. 6. Eenvoudig filter van metaalgaas. Het wordt in de waterloop vóór een sproeikoeler opgenomen (bij *F* in fig. 2) en kan direct aan deze worden bevestigd (zie de linkse en de middelste buis in fig. 3).

gelijkmatig te doen zijn, anderzijds door de practische overweging dat zeer kleine openingen gemakkelijk verstopt raken. Met het oog op dit laatste is als middellijn van de gaatjes 1 mm gekozen, zodat er ongeveer 60 nodig zijn om tot een totale oppervlakte van 0,5 cm² te komen.

Om alle verstoppingsgevaar te voorkomen, is een eenvoudig filter van metaalgaas ontworpen (*fig. 6*), dat in de waterloop onmiddellijk vóór de koeler wordt opgenomen (bij *F*, fig. 2).

Er rest nu nog een aantal kwesties als de volgende: over hoeveel sproeiringen dient men de 60 gaatjes te verdelen, op welke hoogten van de anode kan men de ringen het beste plaatsen, welke is de gunstigste richting van de straaltjes, enz. De antwoorden hierop zijn proefondervindelijk gevonden, o.a. uit temperatuurmetingen (die in de volgende paragraaf ter sprake komen) aan een koeler waarin de genoemde grootheden konden worden gevarieerd. Zoals fig. 5 laat zien, is het aantal sproeiringen op drie bepaald. De beste richting der straaltjes is schuin omhoog naar de anode toe, onder een hoek van 30° met de verticaal.

Metingen

Voor het nauwkeurig meten van de anodetemperatuur werden langs elk van vier beschrijvende lijnen van het anode-oppervlak vijf thermo-elementen aangebracht (*fig. 7a* en *b*).

Over de plaats en over de constructie van deze thermo-elementen kan het volgende worden opgemerkt.

1) Dat voor deze beschrijvende lijnen juist die midden tegenover de openingen tussen de roostersteunstaven zijn gekozen, heeft de volgende reden. Aan een oscillerende buis zijn temperatuurmetingen zeer moeilijk te verrichten, zodat men hiervoor practisch is aangewezen op statische belasting. Het stuurrooster heeft dan een constante negatieve potentiaal, wat een geprononceerde schaduwwerking van de steunstaven ten gevolge heeft: de gedeelten van de anode achter deze staven ontvangen een veel kleinere stroomdichtheid dan tussengelegen gedeelten, en worden dienovereenkomstig minder warm. Om te gunstige metingen uit te sluiten, zijn de meetpunten midden in de openingen tussen de staven gekozen (fig. 7*a*).

Dat men niet met één van deze vier reeksen van punten kan volstaan, vindt zijn grond in kleine, onvermijdelijke asymmetrieën van de stand der inwendige electroden ten opzichte van de anode.

Bij oscilleren van de buis — de normale bedrijfstoestand — bereikt de roosterspanning periodiek waarden in de buurt van nul. Over de tijd gemiddeld, is dan zowel het effect van de schaduwwerking als dat van de asymmetrie veel geringer dan bij statische belasting. Daarom is in de volgende figuren volstaan met het opgeven van het gemiddelde der vier temperaturen; dit gemiddelde zal nagenoeg overeenkomen met de temperatuur die de anode bij dynamische belasting aanneemt.

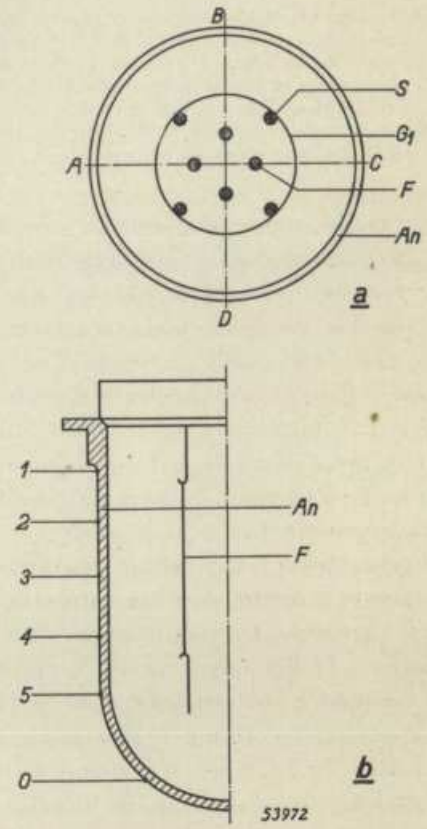


Fig. 7. (*a*) Horizontale en (*b*) verticale doorsnede van een zendbuis PAW 12/15, voorzien van thermo-elementen. *F* = gloeidraad, G_1 = stuurrooster (bij *b* niet getekend), *S* = steunstaven van het rooster, *An* = anode. Langs elk van vier beschrijvende lijnen (*A*, *B*, *C*, *D*) van het anode-oppervlak zijn 5 constantaandraden (*1-5*) gesoldeerd, die tezamen met de koperdraad *0* de polen van vijf thermo-elementen vormen.
Scherm- en vangrooster zijn niet aangegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

2) Om de thermo-elementen zo min mogelijk storing in de waterstroming te doen teweegbrengen, zijn zij op de volgende wijze uitgevoerd. Op elk der punten *0-5* van een beschrijvende lijn (fig. 7*b*) werd in de koperen anode een ondiep gaatje geboord; in de gaatjes *1-5* werd een dunne constantaandraad gesoldeerd, in gaatje *0* een dunne koperdraad, zodanig dat het soldeer het gaatje juist vulde. De zes draden werden geïsoleerd en waterdicht door de koelerwand heen naar buiten gevoerd. Elk der constantaandraden vormt met de koperdraad de polen van een thermo-element.

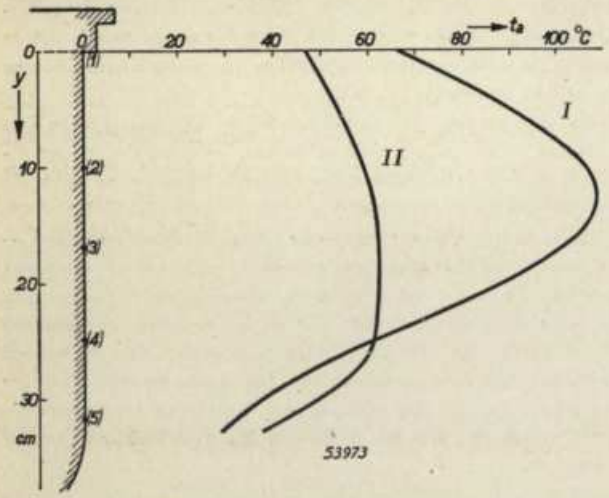


Fig. 8. Anodetemperatuur t_a als functie van de afstand y van de bovenrand der anode van een buis PAW 12/15. Kromme *I* geldt voor de oude koeler (fig. 1), kromme *II* voor de sproeikoeler (fig. 5), beide met 12 liter water per min. Totale dissipatie 14,25 kW. Temperatuur van het koelwater aan de ingang van de koeler 9 °C, aan de uitgang 26 °C. Links is met (*1*)-(*5*) de plaats der vijf thermo-elementen aangeduid.

In *fig. 8* is de anodetemperatuur van de buis PAW 12/15 uitgezet als functie van de verticale afstand *y* tot de bovenrand van de anode. De buis had hierbij de maximaal toegelaten totale dissipatie van 14,25 kW [5]), terwijl per minuut 12 liter water van 9 °C de koeler binnenstroomde. Zoals men ziet, komen bij de oude koeler (kromme *I*) plaatsen met meer dan 100 °C voor; met de sproeikoeler (kromme *II*) komt de hoogste temperatuur nauwelijks boven 60 °C.

Hoe de gemiddelde temperatuur van de warmste zône der anode varieert met de totale dissipatie toont *fig. 9* (kromme *I* voor de oude, *II* voor de nieuwe koeler); *II* ligt ongeveer 40 °C lager dan *I* en blijft ver onder de critische waarde (90 °C), waar de koperoxydevorming begint op te treden. De lijnen t' en t'' in fig. 9 geven de temperatuur van het koelwater bij de ingang resp. de uitgang van de koeler aan.

Ter vergelijking werd nog gemeten, hoeveel water per minuut door de oude koeler moest worden geleid om de anode, bij een gegeven dissipatie, op dezelfde temperatuur te houden als wordt bereikt met een stroom van 12 l/min in de sproeikoeler. Wij vonden dat daarvoor ongeveer 85 l/min nodig was.

Bedrijfsresultaten

In een Nederlandse omroepzender zijn vergelijkende proeven genomen met buizen PAW 12/15 in de oude en in de nieuwe koeler, onder geheel overeenkomstige omstandigheden wat betreft belasting en toevoer van koelwater. In de oude koeler bleek na 170 bedrijfsuren al in vrij sterke mate koperoxyde op de anode te zijn gevormd. Buizen in de sproeikoeler daarentegen waren hier na 4000 bedrijfsuren nog geheel vrij van, zodat het periodieke demonteren, reinigen en hermonteren van de buizen achterwege kon blijven. Hiermede was een belangrijke oorzaak van vroegtijdig uitvallen der buizen opgeheven.

Even gunstige uitkomsten worden gemeld uit een andere zender, die met buizen TAW 12/35 werkt. Ook hier trad in de oude koeler sterke vorming van koperoxyde op. Tijdens het werken van de buis was een luid „zingen" te horen, hetgeen er op duidde dat de anodetemperatuur plaatselijk ver boven 100 °C was. De normale waterstroom hierbij was 20 l/min. Met de sproeikoelers daarentegen werkte de installatie geruisloos en bleef de afzetting

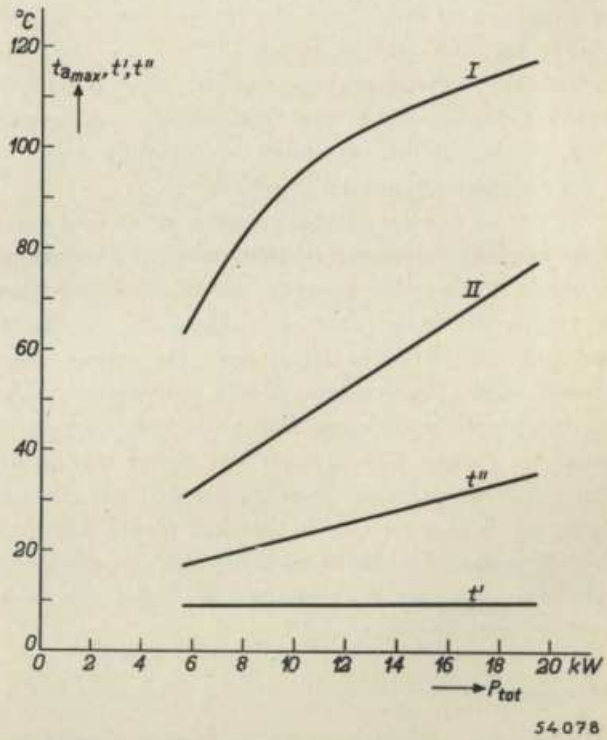


Fig. 9. Als functie van de totale dissipatie P_{tot} zijn aangegeven de anodetemperatuur $t_{a\,max}$ op de warmste meetplaats (*I* voor de oude koeler, *II* voor de sproeikoeler), en de temperaturen t' en t'' van het water aan de ingang resp. de uitgang van de koeler. Waterstroom 12 l/min.

[5]) Hiervan is 1,83 kW gloeidraadvermogen en 0,42 kW schermroostervermogen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van koperoxyde geheel uit, hoewel de waterstroom slechts 16 l/min bedroeg.

Moeilijkheden met verstopping van de gaatjes hebben zich na invoering van het filter (fig. 6) nooit voorgedaan.

Verdere ontwikkelingsmogelijkheden

De sproeikoeler is niet alleen van belang wegens de genoemde verlenging van de levensduur der buizen waarvoor hij is uitgewerkt. Van groter gewicht is nog dat de methode principieel de mogelijkheid opent, voor een bepaald zendvermogen kleinere buizen te ontwerpen, aangezien bij betere koeling een hogere specifieke belasting kan worden toegelaten. Dit geeft vooral voordelen voor buizen die op zeer hoge frequenties moeten werken, want hierbij moeten de capaciteiten tussen de electroden gering zijn en bovendien moet de anodemiddellijn zo klein mogelijk worden gehouden met het oog op de looptijd der electronen van de kathode naar de anode (de looptijd is een der factoren die aan het opvoeren der frequentie een grens stellen). In zulke gevallen kunnen, wat de koeling betreft, nog aanmerkelijk betere resultaten worden verwacht dan boven werden beschreven voor de buizen PAW 12/15 en TAW 12/35; bij nieuwe typen namelijk is men vrij in de keuze van het drukverlies dat men in de koeler wil toelaten. Met een groter drukverlies dan wij boven aannamen laat zich een nog krachtiger turbulentie, dus een nog intensievere koeling bereiken. Daar het drukverlies in de koeler steeds een klein breukdeel is van het drukverschil dat nodig is om het water door de isolatiespiralen te persen, is een verhoging van dit drukverlies van weinig betekenis ten opzichte van de totale druk die de pomp moet leveren.

WEEK IJZER VOOR DE ELECTROMAGNEET VAN EEN CYCLOTRON

door J. J. WENT.

669.127.5:621.318.322

Onderzocht wordt welke eigenschappen week ijzer moet bezitten om een geschikte grondstof te zijn voor de bouw van een electromagneet, zoals die bijv. in een cyclotron wordt toegepast. Daartoe worden eerst de belangrijkste eigenschappen van ferromagnetische materialen besproken en worden deze grondstoffen in vier groepen verdeeld. Nadat van elk dezer groepen enige toepassingen zijn genoemd, wordt vastgesteld, dat het ijzer waaruit een electromagneet vervaardigd moet worden, een hoge verzadigingswaarde en een relatief zeer grote remanentie moet hebben. Als we ons rekenschap geven van het beeld dat we ons van een ferromagnetisch materiaal moeten vormen, dan blijkt, dat de laatste voorwaarde slechts te verwezenlijken is, indien we zorgen, dat de inwendige spanningen gering, en de niet-magnetische insluitsels klein in aantal zijn. Daar deze voorwaarden er ook toe leiden, dat de coërcitieve veldsterkte klein is, kan men dezelfde ijzersoort eveneens gebruiken als materiaal voor de kernen van relais. Ten slotte wordt medegedeeld, hoe de resultaten van dit onderzoek practisch toegepast zijn bij het vervaardigen van het ijzer voor een cyclotron dat door Philips gebouwd is.

Inleiding

Bij kernphysische onderzoekingen is het cyclotron een hulpmiddel van grote betekenis. In verschillende landen zijn met het oog daarop cyclotrons in gebruik genomen. Voor het Instituut voor Kernphysisch Onderzoek te Amsterdam heeft Philips er een gebouwd.

Een cyclotron is een apparaat waarmede men geladen deeltjes grote snelheden (overeenkomende met een gelijkspanning van 10 millioen volt en meer) kan geven. Een belangrijk onderdeel daarvan is steeds een electromagneet van zeer grote afmetingen. In het hier beschouwde geval moest voor de bouw van de magneet 200 ton ijzer verwerkt worden. Het was daarom wel de moeite waard om eerst eens na te gaan aan welke magnetische eisen men dit materiaal het beste kon laten voldoen. De resultaten van dit onderzoek worden in dit artikel medegedeeld.

Om een inzicht te geven in de kwesties die daarbij te pas komen, zullen we eerst enige algemene eigenschappen van ferromagnetische materialen in herinnering brengen. Aan de hand daarvan kan dan een indeling van deze materialen overeenkomstig de verlangde toepassingen worden opgesteld. Uitgaande van inzichten over de magnetische structuur van ferromagnetische stoffen, zal vervolgens worden nagegaan op welke wijze men de eigenschappen van ferromagnetisch materiaal kan beïnvloeden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

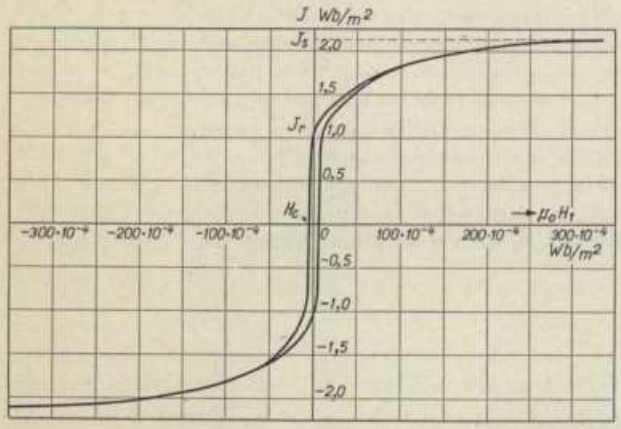
De keuze van de ijzersoort die als grondstof voor de magneet van het bovengenoemde cyclotron gebruikt is, wordt daardoor duidelijk. In het kort wordt daarna ingegaan op de wijze waarop dit ijzer werd vervaardigd.

In de laatste paragraaf van dit artikel wordt aangetoond, dat de soort ijzer die ontwikkeld is voor de electromagneet van het cyclotron, ook zeer geschikt is als materiaal voor de kernen van relais, zoals deze bijv. bij de automatische telefonie in grote aantallen worden toegepast.

De hysteresiskromme zonder en met ontmagnetisatie

De eigenschappen van ferromagnetisch materiaal zijn, zoals bekend, gekarakteriseerd door het verband tussen de inductie B — of de magnetisatie J — en de magnetiserende veldsterkte H. We zullen J als functie van H beschouwen. Het verband tussen beide grootheden wordt voorgesteld door een hysteresiskromme. Daar we in dit artikel van Giorgi-eenheden gebruik zullen maken, verdient het aanbeveling bij het tekenen van deze kromme niet H, maar $\mu_0 H$ — μ_0 is de vacuumpermeabiliteit — als abscis uit de zetten. In het Giorgi-stelsel worden zowel $\mu_0 H$ als de magnetisatie J in Wb/m² uitgedrukt, zodat men dan voor abscissen en ordinaten dezelfde eenheid heeft.

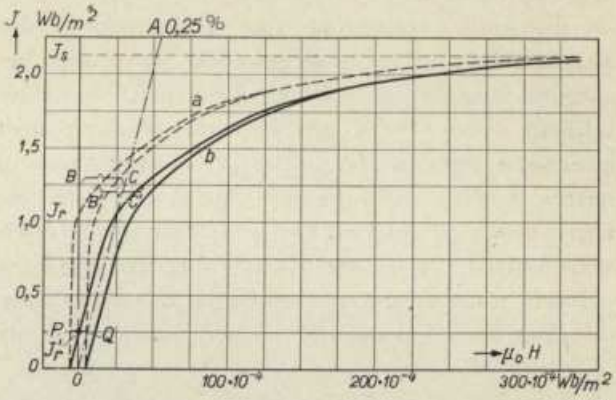
Indien we een normale hysteresiskromme bekijken, zoals in *fig. 1* getekend is, dan vallen direct



54577

Fig. 1. De hysteresiskromme van een ferromagnetisch materiaal. Deze kromme is opgenomen bij een gesloten magnetisch circuit (bijv. een ijzeren ring) en geeft het verband aan tussen de magnetisatie J en de in het ijzer werkzame veldsterkte H_1. Bij een grote veldsterkte bereikt de magnetisatie een verzadigingswaarde J_s. Laat men daarna de veldsterkte geleidelijk nul worden, dan daalt J_s tot de remanentiewaarde J_r. Wil men een magnetisatie nul bereiken, dan is het nodig een coërcitieve veldsterkte H_c in een richting tegengesteld aan die van het oorspronkelijke veld aan te brengen. De grootte van de veldsterkte H_1 is aangegeven door $\mu_0 H_1$ (μ_0 is de vacuumpermeabiliteit) in Wb/m² als abscis uit te zetten. De veldsterkte in oersted kan hieruit worden gevonden door de opgegeven getallen met 10^4 te vermenigvuldigen. De magnetisatie J is ook in Wb/m² uitgedrukt. Om de hiermede corresponderende waarden daarvan in c.g.s. eenheden te vinden moet men de getallen met $10^4/4\pi \approx 800$ vermenigvuldigen.

drie grootheden op, die van belang moeten zijn. Bij een grote veldsterkte H bereikt de magnetisatie een verzadigingswaarde J_s. Laat men nu van deze verzadigingswaarde J_s af de magnetiserende veldsterkte geleidelijk weer nul worden, dan wordt de magnetisatie niet nul; zij daalt niet verder dan tot J_r, de remanentiewaarde. Deze J_r zal in normale



54578

Fig. 2. De „verschoven" hysteriskromme van een ijzeren ring waarin een fijne luchtspleet is aangebracht, die 0,25% van de totale omtrek lang is. Deze kromme geeft het verband aan tussen de magnetisatie en de door de stroomsterkte in de spoel bepaalde „uitwendige" veldsterkte H. In de figuur is voorgesteld hoe men uit kromme a (de „materiaalkromme", fig. 1) de „verschoven" kromme b door grafische transformatie kan afleiden. Daar voor een bepaalde waarde J_1 van de magnetisatie de abscis $\mu_0 H$ van een punt der kromme a met NJ_1 vergroot moet worden (N is de ontmagnetiseringsfactor), trekt men een lijn OA die met de positieve J-as een hoek maakt waarvan de tangens $= N$ is. Voor iedere waarde van J is nu NJ af te lezen. (Zo is bijv. $B'C' = BC$ genomen.) De grootheid J_r moet bij de kromme b vervangen worden door de schijnbare remanentie J_r', die belangrijk kleiner is. Indien (ten gevolge van een kleine coërcitieve veldsterkte H_c en een vrij grote J_r) kromme a nagenoeg loodrecht op de H-as staat, is $J_r' = \mu_0 H_c / N$. Dit is uit de figuur af te lezen, indien men er op let, dat $PJ_r' = J_r'Q$.

gevallen gelijk zijn aan ongeveer 0,5 J_s. Wil men toch een magnetisatie nul bereiken, dan is het nodig een uitwendig magnetisch veld H_c, de coërcitieve veldsterkte, aan te brengen in een richting tegengesteld aan die van het oorspronkelijke veld [1]).

Een dergelijke hysteresiskromme, die dus de representatie is van een materiaaleigenschap, kan men meten aan een gesloten magnetisch circuit (bijv. een gesloten, overal even dikke ijzeren ring), waarop een magnetisch veld werkt. Men kan zich voorstellen, dat dit veld wordt opgewekt door een stroom in een om die ring gewikkelde spoel.

Bij een electromagneet hebben we niet te doen met een gesloten circuit; maar daarbij is een onderbreking aanwezig, de zg. luchtspleet. Het is

[1]) Soms wordt de coërcitieve veldsterkte ook wel gedefinieerd als de veldsterkte die aangebracht moet worden om een inductie $B = 0$ te bereiken. Voor de in dit artikel besproken materialen (met een betrekkelijk kleine coërcitieve veldsterkte) maakt dit in de practijk geen groot verschil.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van belang na te gaan welk verband er in zulk een circuit met luchtspleet bestaat tussen de magnetisatie en de door de spoel bepaalde magnetische veldsterkte H.

Als de ijzeren ring waarover hierboven gesproken is, onderbroken wordt door een fijne luchtspleet, waarvan de lengte bijv. slechts 0,25% van de totale lengte van het ijzer bedraagt, dan verandert de vorm van de kromme van fig. 1 aanzienlijk en gaat deze over in kromme *b* van *fig. 2*. Men krijgt dan een „verschoven" hysteresiskromme.

Een eenvoudige berekening kan de aard aangeven van deze verandering. Zij ontstaat doordat in dit geval de inwendig in het ijzer werkende veldsterkte H_1 niet meer gelijk is aan de door de spoel bepaalde magnetische veldsterkte H. Door de aanwezigheid van de vrije eindoppervlakken bij de luchtspleet, die men als magnetische polen kan opvatten, wordt in het ijzer een ontmagnetiserend veld opgewekt.

Om dit aan te tonen denken we ons een ijzeren ring (*fig. 3*), waarin een onderbreking van de lengte l_2 is aangebracht, terwijl de lengte van het ijzer, gemeten langs de hartlijn, l_1 bedraagt ($l_1 + l_2 = l$).

De luchtspleet zullen we nu zo nauw kiezen, dat de verstrooiing van de magnetische krachtlijnen bij de spleet kan worden verwaarloosd. Dit betekent, dat de inductie in het ijzer B_1 gelijk is aan die in de lucht B_2. Indien we de (absolute) permeabiliteit door μ voorstellen (in ijzer μ_1, in lucht μ_2), dan moet $B_1 = B_2 = \mu_2 H_2$ zijn, waarbij $\mu_2 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

We onderstellen, dat een stroom door een spoel rondom de ring een „uitwendige" veldsterkte H opwekt. Met deze H bedoelen we dus de veldsterkte die in de spoel zou worden opgewekt bij afwezigheid van de ijzeren ring. Indien nu de magnetische veldsterkte binnen het ijzer H_1 en binnen de luchtspleet H_2 is, geldt de betrekking:

$$Hl = H_1 l_1 + H_2 l_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Er van gebruik makend, dat de inductie gelijk is aan de magnetisatie vermeerderd met de inductie in vacuum, vindt men (J_1 = magnetisatie van het ijzer):

$$B_1 = J_1 + \mu_0 H_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

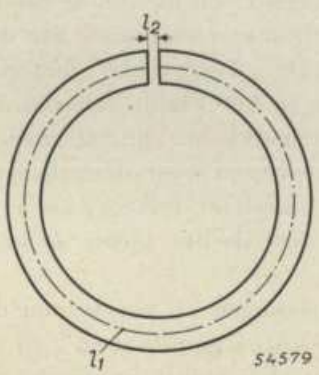


Fig. 3. In een ijzeren ring is een luchtspleet van de lengte l_2 aangebracht; de lengte van het ijzer, gemeten langs de hartlijn is l_1.

Met toepassing hiervan gaat de vergelijking (1) over in:

$$Hl = H_1 l_1 + B_1 l_2/\mu_0 = H_1 l + J_1 l_2/\mu_0$$

of

$$\mu_0 H_1 = \mu_0 H - N J_1 \,, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

indien we $l_2/l = N$ stellen.

Hieruit blijkt, dat ten gevolge van de aanwezigheid van de luchtspleet de in het ijzer werkzame veldsterkte H_1 kleiner is dan de door de electrische stroom opgewekte veldsterkte H. Men drukt dit ook uit door te zeggen, dat het ijzer ten dele ontmagnetiseerd wordt door de tegenwerkende of ontmagnetiserende veldsterkte NJ_1/μ_0.

De grootte van de ontmagnetiserende veldsterkte wordt bepaald door N, in ons voorbeeld de verhouding van de lengte van de luchtspleet en de totale lengte, gemeten langs de hartlijn van de ring, dus een grootheid, die alleen afhangt van de geometrische gegevens van het magnetische circuit. Men noemt N de ontmagnetiseringsfactor.

Van de drie grootheden J_s, J_r en H_c worden J_s en H_c niet beïnvloed door deze ontmagnetisering, maar de remanentie J_r gaat over in de schijnbare remanentie J_r'. Hoe groot deze J_r' is, hangt in het geval van fig. 1, waar een hysteresiskromme met een niet te grote H_c is getekend, nagenoeg alleen af van de grootte van deze H_c en van N, maar vrijwel niet van J_r. Dit is gemakkelijk in te zien.

Het is mogelijk, dat men bij het opnemen van de magnetiseringskromme van een gesloten ring J als functie van H heeft bepaald en dat men daaruit wil afleiden de „verschoven" hysteresiskromme voor het geval waarin, ten gevolge van een aangebrachte luchtspleet, een ontmagnetisering optreedt, die gekenmerkt is door een ontmagnetiseringsfactor N. We willen nagaan, hoe dit door een grafische transformatie kan worden uitgevoerd.

De waargenomen hysteresiskromme („materiaalkromme") geeft de in het ijzer werkzame magnetische veldsterkte $H_1 = f(J)$. Voor een gesloten magnetisch circuit is de door de stroomsterkte van de spoel bepaalde „uitwendige" veldsterkte $H = H_1$, maar voor een ring met een luchtspleet is volgens formule (3) : $H_1 = H - NJ_1/\mu_0$. Vraagt men naar het verband tussen H en J, dan moeten weer twee gevallen onderscheiden worden: zonder luchtspleet is $H = f(J)$ en indien een luchtspleet is aangebracht, is $H = f(J) + NJ_1/\mu_0$. Dit laatste verband wordt voorgesteld door de „verschoven" hysteresiskromme. Deze kan derhalve uit de materiaalkromme worden afgeleid door voor een bepaalde waarde J_1 der magnetisatie de abscis $\mu_0 H_1$ met NJ_1 te vergroten. In fig. 2 is deze constructie uitgevoerd voor een gedeelte van de hysteresiskromme van fig. 1. Om het bedrag NJ_1 grafisch te bepalen kan men door de oorsprong een rechte lijn OA trekken die met de positieve J-as een hoek maakt waarvan de tangens $= N$ is.

Indien men te doen heeft met een materiaal met een kleine coërcitieve veldsterkte ($\mu_0 H_c = 0{,}1 \cdot 10^{-4}$ tot $10 \cdot 10^{-4}$ Wb/m², wat correspondeert met 0,1 tot 10 oersted) en een normale $J_r = 0{,}5\ J_s$, dan loopt de hysteresislus in het punt $\mu_0 H = -\mu_0 H_c$ bijna loodrecht op de H-as en in dit geval is de schijnbare remanentie $J_r' = \mu_0 H_c / N$. Dit blijkt terstond indien men in fig. 2 door het snijpunt van de linkse tak der ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schoven hysteresiskromme met de J-as (J_r') een lijn evenwijdig aan de H-as trekt. Noem de snijpunten van deze lijn met de linkse tak der kromme a en de lijn OA resp. P en Q. Indien de linkse tak van de kromme a nagenoeg loodrecht op de H-as staat, is $\overline{PJ_r'}$ en bijgevolg $\overline{QJ_r'} \approx \mu_0 H_c$, zodat men onmiddellijk afleest: $J_r' = \mu_0 H_c/N$.

Voor het in fig. 1 weergegeven geval met een vrij grote coërcitieve veldsterkte ($\mu_0 H_c = 5 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²) wordt zo bij een luchtspleetlengte van 0,25% de remanentie al gereduceerd tot 0,20 van haar oorspronkelijke waarde, bij een $\mu_0 H_c$ van $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ Wb/m² zou J_r zelfs dalen tot 0,02 daarvan.

Heeft men daarentegen met een grote coërcitieve veldsterkte te doen ($\mu_0 H_c = 100 \cdot 10^{-4}$ tot $1000 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²), zoals in *fig. 4*, dan is de J_r'

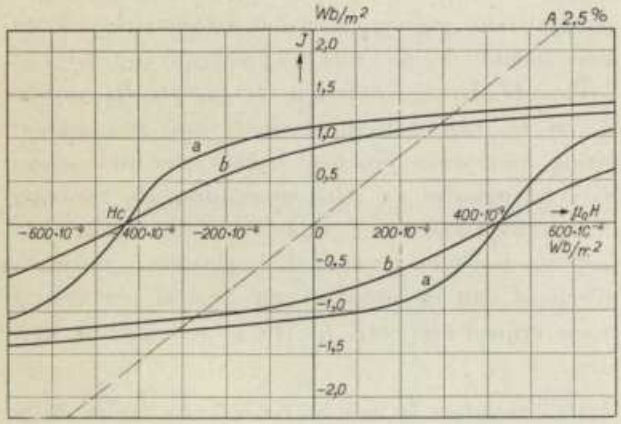


Fig. 4. Hysteresiskrommen voor een materiaal met een grote coërcitieve veldsterkte. Kromme a heeft betrekking op het geval waarbij de ontmagnetisatie nul is (zoals bij een gesloten weekijzeren ring) en kromme b („verschoven" hysteresiskromme) op een ring met een luchtspleet van 2,5%. Het blijkt, dat de schijnbare remanentie in dit geval hoofdzakelijk bepaald wordt door de ware remanentie en de ontmagnetiseringsfactor.

maar weinig kleiner dan J_r. Voor de hierboven genoemde luchtspleet van 0,25% zou dan $J_r' = 0{,}985\ J_r$ zijn en voor de in fig. 4 getekende ontmagnetisering, veroorzaakt door een tien maal zo grote N, is toch nog $J_r' = 0{,}80\ J_r$. In dit geval wordt de J_r' dus in hoofdzaak bepaald door de remanentie en de ontmagnetiseringsfactor.

Als men ten slotte nog bedenkt, dat bij een kleine H_c een smalle hysteresislus behoort, dat is een lus met een klein oppervlak en bij gevolg corresponderend met kleine hysteresisverliezen, en dat een grote H_c gepaard gaat met een brede lus en grote hysteresisverliezen, dan zal de volgende indeling van de ferromagnetische materialen naar aanleiding van hun eigenschappen wel direct duidelijk zijn wat de punten 1) en 2) betreft; in 3) en 4) komen andere eigenschappen naar voren, waaraan eveneens vaak aandacht moet worden geschonken.

Indeling van ferromagnetische materialen en hun toepassingen

We onderscheiden:

1) Materialen met een grote H_c ($\mu_0 H_c > 100 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²): de magnetisch „harde" materialen,
2) Materialen met een kleine H_c ($\mu_0 H_c < 10 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²): de magnetisch „zachte" materialen.
3) Materialen welke een grote magnetische verzadiging bezitten,
4) Materialen met een grote electrische weerstand, waardoor eventuele wervelstroomverliezen klein kunnen zijn.

Gaan we de technische toepassingen van ferromagnetische materialen na, dan blijkt, dat steeds één of meer van deze eigenschappen aanwezig zijn, doch niet altijd die welke verlangd worden.

Electromagneten zal men gaarne zo maken, dat daarbij een zo groot mogelijke magnetische flux door het ijzer gevoerd wordt bij een zo gering mogelijke magnetische veldsterkte. Het materiaal zal daartoe eigenschap 3 moeten bezitten, maar men zal er tevens naar dienen te streven, dat de hoge verzadigingswaarden bij een zo klein mogelijke waarde van de magnetiserende veldsterkte worden bereikt, dus dat de remanentie relatief zeer groot is en de hysteresislus niet te breed is, aangezien anders de dalende tak van de hysteresiskromme wel een grote magnetisatie bij kleine veldsterkten zou aangeven, maar de opgaande tak niet. De laatste voorwaarde betekent, dat de H_c niet al te groot mag zijn.

Permanente magneten, die sterke magnetische velden in luchtspleten moeten opwekken, moeten vervaardigd zijn van materiaal dat aan eis 1 voldoet, want ondanks de sterke ontmagnetisatie door de luchtspleet moet het een grote schijnbare remanentie vertonen. Maar evenzeer moet aan eis 3 worden voldaan, omdat een grote verzadiging nodig is om een grote ware remanentie J_r te verkrijgen.

Bij materialen die men in de hoogfrequentietechniek toepast, zal men in de eerste plaats verlangen, dat zij in zeer hoge mate aan de voorwaarde 4 voldoen. De „Ferroxcube"-materialen, die de laatste jaren in het Philips-laboratorium te Eindhoven zijn ontwikkeld, zijn, als niet-metalen met zeer hoge weerstand voor deze doeleinden uitzonderlijk goed bruikbaar, temeer daar zij ook aan eis 2 voldoen en dus slechts kleine hysteresisverliezen vertonen.

Voor toepassingen op het terrein der laagfrequentietechniek zijn de eisen 2 en 4 ook wel van belang (bijv. bij transformatoren), maar aan 4 behoeft dan toch niet in zo sterke mate voldaan te worden, omdat men door lamelleren de wervel-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

stromen gemakkelijk voldoende kan verminderen, vooral als men ijzerlegeringen gebruikt wier weerstand enige malen zo hoog is als die van zuiver ijzer. Men zal er dan naar streven, dat het materiaal ook de eigenschap 3 bezit, wat bereikbaar is door gebruik te maken van de grote verzadiging van metallisch ijzer. Daardoor kunnen de afmetingen van transformatoren aanzienlijk worden beperkt.

Bij relais, zoals deze bijv. bij de automatische telefonie in grote getale worden gebruikt, moet men weer andere voorwaarden stellen. Men zal verlangen, dat het relais bij een zekere relaisstroom, dus bij een bepaald „uitwendig" veld, zijn anker zal aantrekken. Dit zou aanleiding kunnen geven tot eisen, overeenkomstig aan die welke voor andere electromagneten gesteld worden. Maar veel belangrijker is, dat het relais zich moet openen als de relaisstroom nul wordt, dwz. dat de remanentie klein moet zijn. Dit kan in het algemeen bereikt worden door ook in de bekrachtigde toestand van het relais nog een kleine luchtspleet te laten bestaan (bijv. door een niet ferromagnetisch kleefplaatje aan te brengen) zodat men niet met de ware, maar met een schijnbare remanentie heeft te doen. Maar daarnaast is tenminste even belangrijk, dat de waarde van de coërcitieve veldsterkte zo klein mogelijk is en dat deze waarde in de loop van de tijd niet oploopt. Indien de grootte van de coërcitieve veldsterkte niet vrij van veranderingen is, zal het beste relais op de duur kunnen gaan plakken. Op deze relais komen we nog terug aan het einde van dit artikel.

Alvorens te bespreken hoe de bovengenoemde eisen in de practijk bij de vervaardiging van ijzer voor de electromagneet van een cyclotron werden verwezenlijkt, willen we nagaan welk beeld we ons moeten vormen van een ferromagnetisch materiaal. Zonder diep in te gaan op theoretische overwegingen aangaande het ferromagnetisme, zullen we daarbij enkele resultaten van deze theorieën vermelden. We zullen ons in hoofdzaak beperken tot die resultaten welke het ontstaan van een grote remanentie en een kleine coërcitieve veldsterkte kunnen verklaren.

Beeld dat men zich van een ferromagnetisch materiaal moet vormen

Volgens de gebruikelijke voorstelling is een ferromagnetisch materiaal in de ontmagnetiseerde toestand verdeeld in een aantal kleine elementaire gebiedjes, de zg. gebiedjes van Weiss, waarvan de afmetingen in normale gevallen 10 tot 100 μ bedragen en waarbinnen de stof geheel verzadigd is. Indien de toestand van het materiaal als geheel onmagnetisch is of althans belangrijk verschilt van die der verzadiging J_s bij de beschouwde temperatuur, dan hebben deze gebiedjes verschillend gerichte magnetiseringsvectoren. Het feit, dat de magnetisatie in elk elementair gebiedje een zeer bepaalde richting heeft, wil zeggen, dat de verschillende richtingen in magnetisch opzicht niet gelijkwaardig zijn; met andere woorden: er bestaan blijkbaar magnetische anisotropiekrachten, die de volgende oorzaken kunnen hebben.

Er blijken in de eerste plaats kristallografische voorkeursrichtingen voor de magnetisatie te bestaan. Bij verschillende metalen en legeringen kunnen deze richtingen nog weer verschillend zijn. In het geval van zuiver ijzer blijken de drie onderling loodrechte kubusrichtingen van het (kubisch ruimtelijk gecentreerde) ijzerkristal energetisch voorkeursrichtingen voor de magnetisatie te zijn, waarmede bedoeld wordt, dat de potentiële energie het kleinste is als de magnetisatie volgens zulk een voorkeursrichting is gericht. Het verschil tussen de magnetische energie voor de richtingen van de gemakkelijkste en de moeilijkste magnetisatie noemt men wel de kristalenergie E_k.

In de tweede plaats kunnen er voorkeursrichtingen ontstaan ten gevolge van bestaande spanningen. Deze hangen samen met het verschijnsel van de magnetostrictie. Wanneer men een ferromagnetisch materiaal magnetiseert door een aangroeiend uitwendig veld, dan zullen geleidelijk de ten opzichte van het uitwendige veld gunstig georienteerde elementaire gebiedjes gaan groeien ten koste van de ongunstig georienteerde, waardoor de magnetisatievector ongeveer in de veldrichting komt te staan, zodat ten slotte bij grote veldsterkte al deze vectoren die richting aannemen. Het materiaal zal daarbij vormveranderingen ondergaan die met deze veranderingen in de magnetisatierichting samenhangen en bij het wegnemen van het veld weer verdwijnen. Omgekeerd moeten elastische vormveranderingen dan ook van invloed zijn op de magnetisatierichting in de elementaire gebiedjes. De grootte van de voorkeursenergie die hier het gevolg van is, wordt bepaald door het product van de magnetostrictieconstante λ (die gelijk is aan de relatieve lengteverandering tussen de geheel ontmagnetiseerde en de verzadigde toestand van het materiaal) en de amplitude van de inwendige spanningsvariatie σ_i.

Welke van de twee juist genoemde anisotropieën zal overwegen, hangt daarvan af, of E_k groter of kleiner is dan $\lambda\sigma_i$. Maar ook indien E_k zeer groot is ten opzichte van $\lambda\sigma_i$, wat bij ijzer meestal het geval is, dan kan toch de spanningsanisotropie nog een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

belangrijke rol spelen, daar het immers mogelijk is, dat de voorkeursrichting ten gevolge van de magnetostrictie juist samenvalt met een van de drie kristallografische voorkeursrichtingen, zodat men dan met een éénassige inplaats van met een drieassige voorkeur te doen heeft.

In de derde plaats is de vorm van het ferromagneticum van invloed op de magnetisatierichtingen. Dit hangt samen met het feit, dat een ferromagneticum in verschillende richtingen een andere ontmagnetiseringsfactor zal hebben en dus ook een ontmagnetiserend veld van andere sterkte. Maar ook al zien we af van de uitwendige vorm van het ferromagneticum, dan zal de „inwendige" vorm nog een belangrijke rol spelen. De inwendige vorm wordt bepaald door kleine niet-magnetische insluitsels [2]), zoals deze in ieder niet volkomen zuiver ferromagnetisch metaal voorkomen. Het blijkt, dat het energetisch een groot voordeel geeft, indien de magnetisatie zoveel mogelijk evenwijdig aan zo'n niet-magnetisch oppervlak verloopt. Dit moet daaruit worden verklaard, dat in het tegenovergestelde geval in het materiaal vrije magneetpolen op de vrije oppervlakken ontstaan, die een tegenwerkend magnetisch veld opwekken.

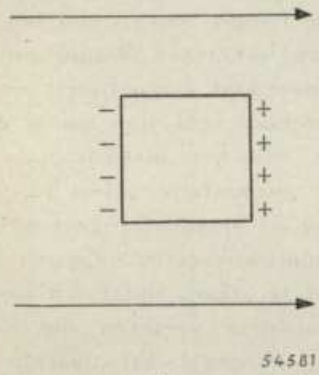


Fig. 5. Het ontstaan van vrije magneetpolen bij een kubusvormige luchtholte. De pijlen geven de richting van de magnetisatie in het ijzer aan.

Stelt men zich voor, dat er binnen in een elementair gebiedje (zie *fig. 5*) een bijv. kubusvormige luchtholte zou zitten en dat men zou wensen, dat daardoor geen verstoring van de magnetisatie rondom dat insluitsel zou optreden, dan moet de inductie in het ijzer B_1 en die in de lucht B_2 even groot zijn. Dit zal het geval zijn, indien er geen ontmagnetiserende polen gevormd worden, dus wanneer de magnetisatie evenwijdig aan een luchtoppervlak verloopt. Zou dus het niet-magnetische insluitsel een langgerekte vorm bezitten, dan zal een magnetisatie in de pijlrichting (*fig. 6*) energetisch veel gunstiger zijn dan een magnetisatie loodrecht op deze richting.

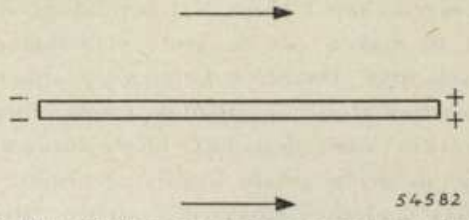


Fig. 6. Het ontstaan van vrije magneetpolen, indien een niet-magnetisch insluitsel een langgerekte vorm heeft.

De niet-magnetische insluitsels geven ook aanleiding tot het ontstaan van inwendige spanningen; zij zullen als gevolg daarvan bovendien via de magnetostrictie invloed kunnen uitoefenen.

Wij zullen nu nagaan, hoe de remanentie en de coërcitieve veldsterkte passen in het hierboven met enkele trekken geschetste beeld van een ferromagneticum.

Remanentie

Met de volgende eenvoudige beschouwing kan men het verband tussen remanentie en verzadiging aangeven.

We denken ons een polykristallijn materiaal waarin zoveel verschillende anisotropiekrachten werken, dat in het materiaal als geheel de voorkeursrichting helemaal willekeurig is. Men moet nu verwachten, dat in de volkomen ontmagnetiseerde toestand ($J = 0$ voor $H = 0$), die bijv. verkregen kan worden door het materiaal bij een uitwendig veld $H = 0$ van boven het Curie punt af te koelen, ieder elementair gebiedje een bepaalde, energetisch de gunstigste, voorkeursrichting zal bezitten en dat alle magnetiseringsvectoren dan willekeurig verdeeld zullen zijn over een bol, zoals in *fig. 7a* is aangegeven. Gaat men nu het materiaal verzadigen door middel van een grote magnetische veldsterkte H in de richting die in fig. 7 door een pijl is aangewezen, dan zullen alle magnetiseringsvectoren deze richting aannemen (fig. 7*b*). Na het verwijderen van het veld zullen de oude voorkeursrichtingen hun rechten hernemen, maar daar twee tegengestelde richtingen energetisch gelijkwaardig zijn, zullen de vectoren alleen de ene helft van de bol (fig. 7*c*) vullen. Men krijgt dan $J_r = J_s \overline{\cos \alpha}$, waarbij de streep boven cos α aangeeft, dat over alle voorkomende hoeken, dus in dit geval over een halve bol gemiddeld moet worden. Dit levert de uitkomst: $J_r = 0{,}5\ J_s$.

Het is ook mogelijk materialen te ontwikkelen, waarvoor $J_r > 0{,}5\ J_s$ is. We willen aangeven aan

[2]) Waar in dit artikel gesproken wordt over niet-magnetische insluitsels, zijn daaronder ook insluitsels begrepen die, hoewel magnetisch, veel minder sterk ferromagnetisch zijn dan het grondmateriaal.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

welke voorwaarden dan moet worden voldaan en welke verklaring wij daarvoor kunnen geven. Daartoe onderstellen we, dat de inwendige spanningsfluctuaties σ_i zo klein zijn dat $\lambda\sigma_i \ll E_k$ is en dat verder niet-magnetische insluitsels òf ontbreken òf zo grote afmetingen bezitten, dat ze magnetisch weinig schadelijk zijn (daartoe moeten hun afmetingen van de orde van grootte van de elementaire gebiedjes worden). We hebben dan dus alleen met de kristalanisotropie te maken; de magnetisatievectoren in alle elementaire gebiedjes zullen zich daarbij gaan plaatsen in één der kristallografische voorkeursrichtingen. Na de verzadiging volgens fig. 7*b* zal men bij ijzer dus niet een remanentie volgens fig. 7*c* krijgen, maar een volgens fig. 7*d*, aangezien steeds de kubische as die het dichtst bij de veldrichting ligt, als voorkeursrichting zal worden gekozen. De halve tophoek van de bolsector die op deze wijze wordt gevuld, bedraagt ca 58°. Dit is nl. de hoek tussen een lichaamsdiagonaal en een ribbe van een kubus. Het is gemakkelijk in te zien, dat deze halve tophoek niet groter dan 58° kan zijn, want dan valt er toch steeds tenminste één kubische asrichting binnen, die zal optreden als voorkeursrichting. In dit geval zal men de remanentie verkrijgen door $J_s \cos\alpha$ te middelen, niet over een halve bol (90°) maar over een bolsector waarvan de halve tophoek 58° bedraagt, zodat er komt

$$J_r = 0{,}78\, J_s.$$

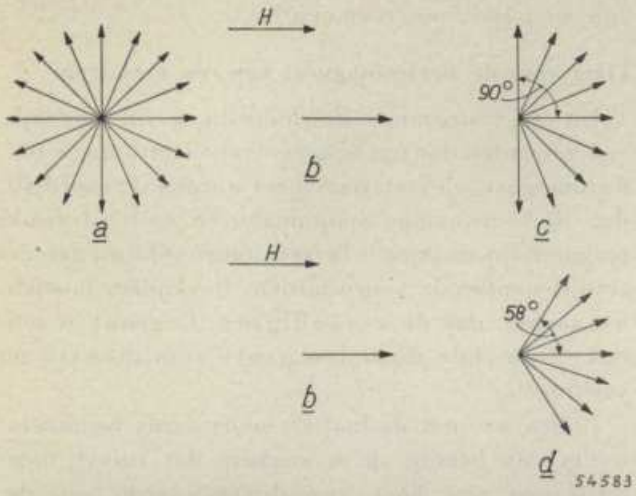


Fig. 7. Schematische voorstelling van de richting der magnetiseringsvectoren van de elementaire gebiedjes van een polykristallijn ferromagnetisch materiaal:
a) in de volkomen ontmagnetiseerde toestand zijn de richtingen der vectoren willekeurig verdeeld;
b) indien het materiaal verzadigd wordt door een uitwendige veldsterkte H, nemen alle vectoren de richting van H aan;
c) na het verwijderen van de uitwendige veldsterkte verdelen de vectoren zich over een halve bol;
d) als $\lambda\sigma_i \ll E_k$ (waarbij E_k betrekking heeft op een kubische structuur) en de niet-magnetische insluitsels ontbreken of een zeer geringe invloed hebben, bevinden de vectoren zich binnen een bolsector met een halve tophoek van 58°.

Met behulp van de hierboven gegeven redenering hebben wij dus de voorwaarden gevonden waaraan ijzer moet voldoen om een grote remanentie op te leveren: nl., het moet slechts kleine inwendige spanningen vertonen en weinig niet-magnetische insluitsels bevatten. Deze zelfde voorwaarden leveren echter ook, zij het om andere redenen, een kleine coërcitieve veldsterkte op.

De coërcitieve veldsterkte

Om het verband tussen spanningen en insluitsels enerzijds en de coërcitieve veldsterkte anderzijds aan te geven zouden we dieper op de theorie van het coërcitieve veld moeten ingaan dan in dit artikel kan gebeuren. Een enkel woord kan er echter wel over worden gezegd.

Zoals hierboven reeds is uiteengezet, zijn voor het geval van de verzadiging de „magneetjes" in ieder elementair gebiedje parallel georienteerd en daardoor is zo'n gebiedje steeds verzadigd, althans voor zover de temperatuurbeweging dit toelaat. Op de grens van twee gebiedjes zal de voorkeursrichting van het ene gebiedje in die van het andere moeten overgaan. In deze grenszone, die wel de wand van het elementaire gebiedje wordt genoemd zullen dus:

1) de magneetjes niet meer parallel georienteerd zijn, wat energie kost;
2) de magneetjes een magnetisatierichting hebben aangenomen, die niet behoeft overeen te stemmen met de voorkeursrichting ter plaatse, wat eveneens energie kost.

Deze wand zal derhalve een zekere hoeveelheid energie per cm² van haar oppervlak bezitten.

Het is nu gebleken, dat de macroscopische magnetisatie van magnetisch zachte materialen bij betrekkelijk lage veldsterkten plaats vindt door verplaatsingen van dergelijke wanden, waardoor de gebiedjes die gunstig gemagnetiseerd zijn ten opzichte van het uitwendige veld, zullen groeien en de ongunstig georienteerde zullen worden „opgegeten". De grootte van de coërcitieve veldsterkte van het materiaal wordt bepaald door de gemakkelijkheid (bij kleine H_c) of de moeilijkheid (bij grotere H_c) waarmee deze wanden kunnen worden verplaatst.

Wat zijn de belemmerende factoren bij deze wandverschuivingen? In de eerste plaats kan men zich voorstellen, dat de energie van de wand zelf nog een functie is van de plaats waar de wand zich

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bevindt, hetzij doordat de energie per cm² wandoppervlakte ten gevolge van spanningsfluctuaties (σ_i) varieert, hetzij doordat er in de wand niet-magnetische insluitsels zijn opgenomen waardoor de totale wandoppervlakte die in rekening moet worden gebracht, vermindert. Men zal bij deze wandverplaatsingen telkens kleine bedragen energie moeten toevoeren, die even later weer in de vorm van warmte verloren gaan. Zowel spanningsfluctuaties als onmagnetische insluitsels werken er dus toe mee om de coërcitieve veldsterkte te verhogen.

Ten slotte moet er nog op worden gewezen, dat ook binnen de elementaire gebiedjes door inwendige spanningen kleine fluctuaties in de magnetisatierichting en door insluitsels kleine variaties in de intensiteit van de magnetisering optreden, welke beide effecten eveneens magnetische energie kosten.

Hierboven is al uiteengezet, dat een niet-magnetische inclusie een ontmagnetiseringsenergie vertegenwoordigt. Zonder dat de kwantitatieve berekeningen hiervoor worden gegeven, is uit de twee tekeningen *a* en *b* van *fig. 8* wel direct duidelijk,

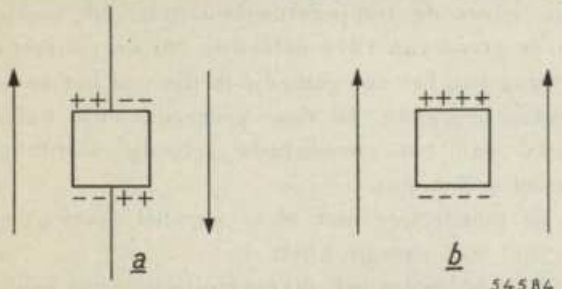


Fig. 8. De invloed van de wand van een elementair gebiedje op de grootte van de ontmagnetiseringsenergie die een niet-magnetisch insluitsel oplevert.
a) Een kubusvormig insluitsel ligt op de grens van twee elementaire gebiedjes.
b) Het insluitsel ligt binnen één elementair gebiedje.
In het tweede geval is de ontmagnetiseringsenergie veel groter dan in het eerste.

dat de ontmagnetiseringsenergie in geval *b* veel groter zal zijn dan in geval *a*. Verplaatst de in fig. 8*a* getekende wand zich zo dat het insluitsel geheel in één elementair gebiedje komt te liggen, dan zal dus behalve de energievermeerdering door de vergroting van de wandoppervlakte ook nog een energievermeerdering door deze vergrote ontmagnetiseringsenergie optreden. De vorm en de afmetingen van de inclusie zullen bepalen welke van deze twee effecten zal overwegen. De hiervoorgenoemde fluctuaties in de magnetisatierichting in het inwendige van een elementair gebiedje geven eveneens aanleiding tot het ontstaan van fictieve magnetische ladingen en dus tot energiefluctuaties bij het verplaatsen van een wand.

de koolstof met zuurstof tot CO. Daartoe kan men afhankelijk van de plaats van de wand, een invloed uitoefenen die leidt tot een verhoging van de coërcitieve veldsterkte.

Hieruit blijkt, dat de voorwaarden waaraan ijzer moet voldoen om een kleine coërcitieve veldsterkte te kunnen opleveren, zijn: slechts kleine inwendige spanningen en maar weinig niet-magnetische insluitsels, dezelfde dus die nodig zijn voor een hoge remanentie.

IJzer voor de electromagneet van een cyclotron

Uit de voorgaande beschouwingen zal duidelijk zijn geworden dat ten behoeve van electromagneten ferromagnetisch materiaal moet worden vervaardigd dat, wat inwendige spanningen en niet- of zwak magnetische insluitsels betreft, moet voldoen aan de zojuist genoemde voorwaarden. Bovendien moeten we zorgen, dat de verzadiging J_s groot is om ook in absolute maat een grote remanentie te verkrijgen.

Indien we met de laatste voorwaarde beginnen, is het van belang op te merken, dat zuiver ijzer reeds een zeer hoge verzadigingswaarde van de magnetisatie heeft, nl. $21\,000 \cdot 10^{-4}$ Wb/m² (d.i. ca 1700 c.g.s.-eenheden). Nog hogere waarden van de verzadiging zijn slechts bereikt door grote hoeveelheden (15 tot 35%) van het zeer dure cobalt in ijzer op te lossen. De J_s stijgt dan nog enigszins, nl. tot 2,25 à 2,50 Wb/m². Ieder ander in ijzer oplosbaar element verlaagt de verzadiging. Men zou daarom geneigd zijn een volkomen zuiver en spanningsvrij ijzer te verlangen. Maar het is niet mogelijk dit op technische schaal te bereiden. Men moet daarom wel nagaan op welke wijze en in hoeverre men de schadelijkste elementen uit het ijzer kan verwijderen.

Op de lijst der altijd voorkomende en voor het magnetisme van week ijzer zeer schadelijke bijmengsels staat koolstof bovenaan. Dit element, dat bij kamertemperatuur in ijzer zo goed als onoplosbaar is, komt meestal voor in de bij lage temperaturen metastabiele vorm van cementiet (Fe_3C), terwijl de bij deze temperaturen stabiele vorm van grafiet veel moeilijker is te verkrijgen. Hoewel cementiet ook nog wel zwak magnetisch is, werkt het als insluitsel veel ongunstiger dan het onmagnetische grafiet, alleen al doordat eenzelfde percentage koolstof een veel groter volume cementiet dan grafiet oplevert; dit verschilt nl. een factor 4,5. Een gehalte van 6,7 gew. % C zou al voldoende zijn om het ijzer geheel in cementiet om te zetten.

Het eenvoudigste middel om koolstof uit het ijzer te verwijderen bestaat in het verbranden van

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Op deze wijze kunnen derhalve energiefluctuaties tijdens het smelten òf lucht door de smelt heen blazen òf voldoende ijzeroxyde toevoegen bijv. in de vorm van erts. Deze laatste methode is toegepast door de firma De Muinck Keyzer te Utrecht, de leverancier van het ijzer dat nodig was voor de electromagneet van het cyclotron te Amsterdam. Dit oxydatieproces werd in een Siemens Martin-oven, waarin het ijzer onder een laag vloeibare slak werd gesmolten, zolang voortgezet totdat het C-gehalte tenminste lager was geworden dan 0,06%. Tengevolge van deze behandeling ontstond er in het ijzer een overmaat zuurstof, welke vlak voor het gieten werd verwijderd door 0,5% Al aan de smelt toe te voegen. De zuurstof werd daarbij gebonden in de vorm van Al_2O_3 en kwam op deze wijze voor een belangrijk gedeelte in de slak terecht. Bovendien werd, tegelijk met de 0,5% Al ook nog 0,5% Si toegevoegd. Dit houdt daarmede verband, dat men de koolstof die nog niet verbrand is, liefst in de vorm van grafiet in het ijzer wil hebben. Hoewel bij lage temperatuur grafiet, in tegenstelling met cementiet, de stabiele vorm is, vormt het zich zo moeilijk, dat er, indien men geen bijzondere voorzorgen neemt, meestal weinig van ontstaat. Nu hebben echter zowel silicium als aluminium de eigenschap deze grafietvorming te bevorderen. Deze twee elementen werden tezamen gevoegd, omdat, naar wij menen, de combinatie van deze beide voor de grafietvorming nog gunstiger werkt dan één element afzonderlijk.

Deze toevoeging van Al en Si heeft natuurlijk het nadelige gevolg, dat beide de verzadiging van het ijzer verlagen. Het op deze wijze vervaardigde ijzer heeft een J_s van ca 2,0 Wb/m² terwijl de chemische samenstelling er ongeveer als volgt uitziet:

C	0,05%
Si	0,45%
Al	0,35%
Mn	0,25%.

Het blijkt hieruit, dat een gedeelte van het aluminium voor de desoxydatie is gebruikt en in de slak is verdwenen. Mangaan is een weinig schadelijk element, dat in ieder technisch ijzer voorkomt.

In *fig. 9* is de hysteresiskromme getekend van een ijzergieting die op de hierboven beschreven wijze is tot stand gekomen. De remanentie bedraagt ca 70% van de verzadiging van 2,0 Wb/m², welke laatste eerst bij zo hoge veldsterkten wordt bereikt, dat zij in de grafiek niet meer kan worden afgelezen. We hebben hier dus een voorbeeld van een materiaal waarbij $J_r > 0{,}5\ J_s$ is. De coërcitieve veldsterkte heeft een voor een technische ijzersoort zeer lage waarde ($\mu_0 H_c = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²). Dit is een gemiddelde. Uiteraard geven de verschillende gietingen uiteenlopende waarden, maar de coërcitieve veldsterkte is steeds zo klein dat $\mu_0 H_c$ ligt tussen $0{,}3 \cdot 10^{-4}$ en $0{,}7 \cdot 10^{-4}$ Wb/m².

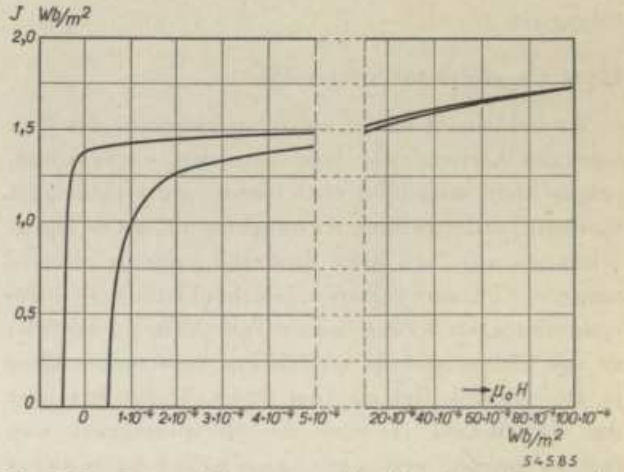


Fig. 9. Een hysteresiskromme van het ijzer dat werd gebruikt bij de bouw van de electromagneet voor een cyclotron. De verzadiging J_s is 2,0 Wb/m², maar deze wordt eerst bij zo hoge veldsterkten bereikt, dat zij in de grafiek niet kan worden afgelezen. De remanentie bedraagt ca 70% van J_s. De coërcitieve veldsterkte is heel klein ($\mu_0 H_c = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²). Voor $\mu_0 H > 5 \cdot 10^{-4}$ werd een andere schaal gebruikt dan voor $\mu_0 H < 5 \cdot 10^{-4}$.

Hoezeer de eigenschappen van het voor het cyclotron ontwikkelde ijzer gunstig afsteken bij die van andere weke ijzersoorten blijkt uit *tabel I*. In de ene kolom is vermeld welke magnetiserende veldsterkte moet worden aangelegd om een magnetisatie van 1,5 Wb/m² te bereiken, in de andere hoe groot de coërcitieve veldsterkte is. Het materiaal Hyperm 0 is een speciale ijzersoort, die door

Tabel I. Vergelijking van de magnetische eigenschappen van enige soorten week ijzer

Soort ijzer	Veldsterkte (in waarden van $\mu_0 H$) om $J = 1{,}5$ Wb/m² [3]) te bereiken [4])	Coërcitieve veldsterkte ($\mu_0 H_c$ in Wb/m²) [4])
Vloeiijzer	$20 \cdot 10^{-4}$	$(1{,}5\text{-}3) \cdot 10^{-4}$ *)
Hyperm 0 (automatenkwaliteit)	$23 \cdot 10^{-4}$	$(0{,}8\text{-}1{,}5) \cdot 10^{-4}$
Dynamo plaat	$16 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Hyperm 0 (normaal)	$12{,}5 \cdot 10^{-4}$	$(0{,}5\text{-}1) \cdot 10^{-4}$
Armco	$10 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$ *)
Cyclotronijzer	$8 \cdot 10^{-4}$	$(0{,}3\text{-}0{,}7) \cdot 10^{-4}$
Wemco-ijzer (99,95% Fe)	$1 \cdot 10^{-4}$	$0{,}05 \cdot 10^{-4}$

*) Deze materialen kunnen met de tijd veranderen (verouderen), waardoor H_c toeneemt.
[3]) Corresponderend met 1200 c.g.s.-eenheden of 15 000 gauss.
[4]) Om de veldsterkte in oersted te verkrijgen moet men de hier opgegeven getallen met 10^4 vermenigvuldigen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Krupp voor relais wordt gebruikt. Het in de laatste regel van de tabel genoemde Wemco-ijzer wordt vermeld om aan te tonen wat bij een zorgvuldige behandeling in een laboratorium is te bereiken, hoewel natuurlijk niet op technische schaal; dit materiaal kan dan ook in de practijk niet worden toegepast.

IJzer als grondstof voor relais

We hebben er boven reeds op gewezen, dat ijzer waarvan kernen voor relais worden vervaardigd, een zo klein mogelijke coërcitieve veldsterkte moet hebben. Verder hebben we aangetoond, dat de eigenschappen van het ijzer, bestemd voor de electromagneet van een cyclotron, (slechts kleine inwendige spanningen en weinig niet-magnetische insluitsels) er toe leiden, dat de coërcitieve veldsterkte klein is. De conclusie ligt nu voor de hand, dat het ijzer dat ontwikkeld is voor de electromagneet van een cyclotron, een zeer geschikte grondstof vormt voor de fabricage van relais.

Terloops is boven ook reeds opgemerkt, dat de coërcitieve veldsterkte van ijzer dat voor relais wordt gebruikt, niet in de loop van de tijd mag toenemen. Het materiaal moet een kleine coërcitieve veldsterkte hebben om daardoor een kleine schijnbare remanentie te verkrijgen. En dit laatste is van belang, omdat het daardoor mogelijk wordt bij de montage het relais zo in te stellen, dat „plakken" inderdaad uitgesloten is. Indien in de loop van de tijd de coërcitieve veldsterkte gaat toenemen (het materiaal dus gaat „verouderen"), dan is het mogelijk, dat de schijnbare remanentie zo groot wordt, dat het relaisanker niet meer terugvalt. Vele normale technische ijzersoorten blijken deze hinderlijke veroudering te vertonen. De oorzaak van dit verschijnsel kan worden gevonden in een uitscheidingsmechanisme, waarbij in het bijzonder stikstof, maar ook wel koolstof, schadelijk is, die zich dan in de vorm van nitriden resp. carbiden gaan uitscheiden. Stikstof lost bij kamertemperatuur bijna helemaal niet in ijzer op en bij hoge temperaturen enigszins; maar de γ-fase van ijzer, die tussen 900 en 1400 °C stabiel is, vertoont een sterk oplosvermogen voor stikstof. Indien evenwel ijzer dat stikstof bevat, wordt afgekoeld, dan zal dit element niet direct in zijn geheel als nitride uit de oplossing worden afgescheiden; met andere woorden: dan zal de oplossing oververzadigd worden. Wanneer er dan na zeer lange tijd toch nog enige vorming van nitride plaats heeft, zal deze in uiterst fijn verdeelde vorm in het ijzer voorkomen, verstoringen van het rooster veroorzaken en dus inwendige spanningen en niet-magnetische insluitsels doen ontstaan, die de coërcitieve veldsterkte verhogen. Om dit euvel tegen te gaan zijn eveneens toevoegingen van silicium en aluminium gewenst, zowel omdat zij de stikstof, evenals de zuurstof, uit het ijzer binden en verwijderen, als ook omdat zij het temperatuurgebied waarin ijzer niet ruimtelijk, maar vlakken-gecentreerd is, verkleinen. Percentages van deze elementen, zoals hier toegepast, brengen dit gebied nl. van 900 tot 1400 °C terug op 1000 tot 1300 °C. Hoe kleiner dit gebied is en hoe hoger de overgangstemperatuur van de vlakken-gecentreerde naar de ruimtelijk gecentreerde fase ligt, des te geringer zullen de hoeveelheden stikstof zijn die in de oververzadigde oplossing blijven. De hier besproken ijzersoort, waaraan zoals boven medegedeeld is, geringe hoeveelheden Si en Al zijn toegevoegd, is volkomen verouderingsvrij; een verhitting van 500 uren op 100 °C heeft niet de minste invloed op de waarde van de coërcitieve veldsterkte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!